

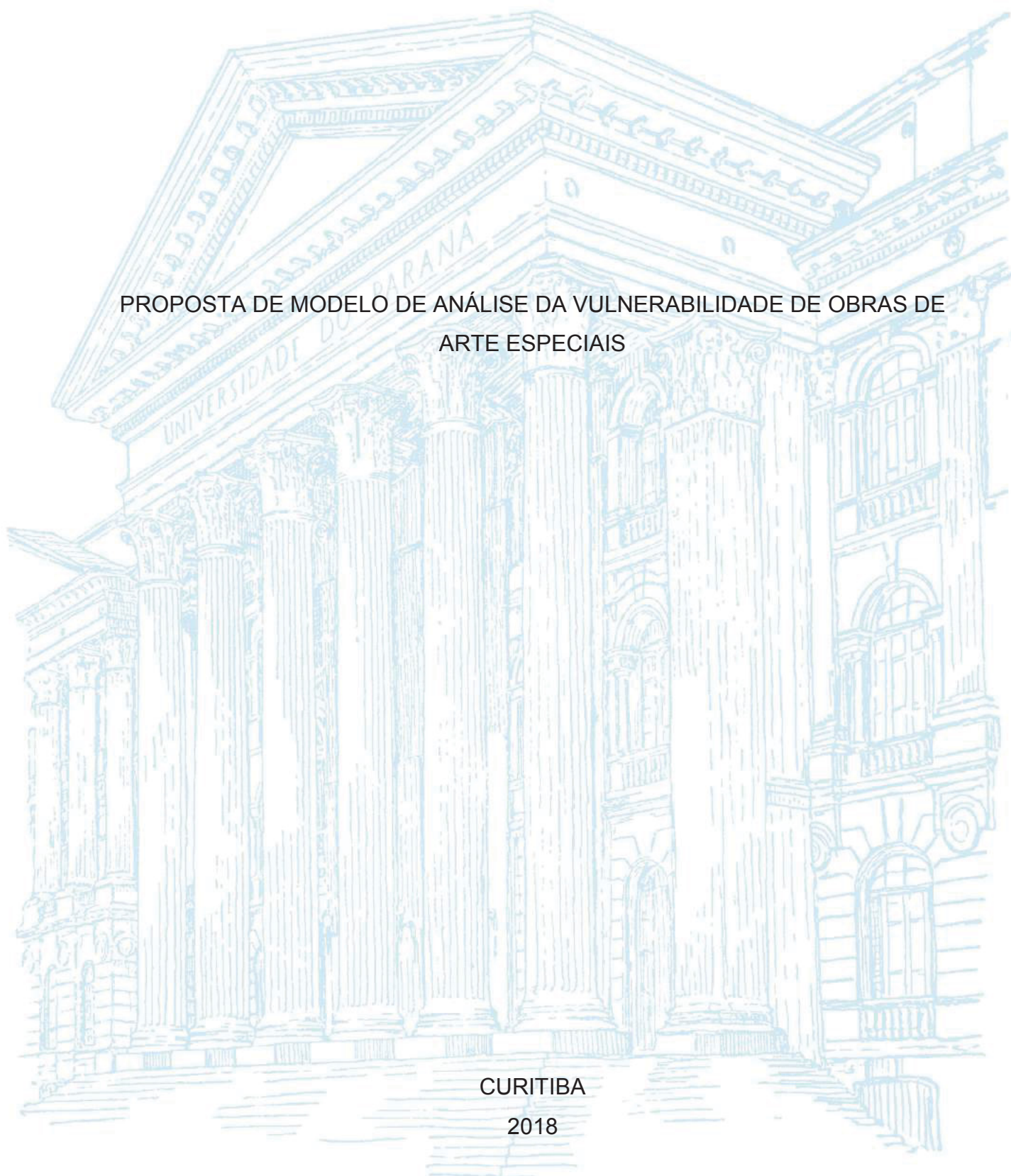
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA BECKER DOMINGUES

PROPOSTA DE MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE OBRAS DE
ARTE ESPECIAIS

CURITIBA

2018



GABRIELA BECKER DOMINGUES

PROPOSTA DE MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE OBRAS DE
ARTE ESPECIAIS

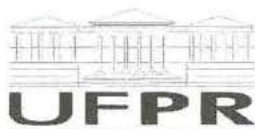
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen

Coorientador: Prof. PhD. Mauro Lacerda Santos Filho

CURITIBA

2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL


TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GABRIELA BECKER DOMINGUES** intitulada: **PROPOSTA DE MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE OBRAS DE**

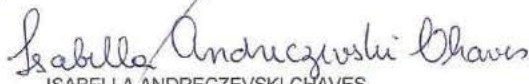
ARTE ESPECIAIS, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVADA no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 29 de Novembro de 2018.


CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN
Presidente da Banca Examinadora


MAURO LACERDA SANTOS FILHO
Avaliador Externo (UFPR)


ISABELLA ANDRECZEWSKI CHAVES
Avaliador Externo (UFPR)


ROBERTO DALLEDONE MACHADO
Avaliador Interno (UFPR)


EDUARDO RATTON
Avaliador Externo (UFPR)


ADRIANA DE PAULA LACERDA SANTOS
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de viver e incansável proteção.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen, pela orientação e confiança.

Ao meu coorientador, Prof. PhD. Mauro Lacerda Santos Filho, por sempre acreditar no potencial desta pesquisa ao longo destes mais de quatro anos de estudo. Agradeço, ainda, por todas as oportunidades que proporcionou através do EMEA, as quais continuam sendo determinantes para minha formação.

Aos meus pais, Patrícia e José Mauro, por sempre acreditarem e continuarem investindo em mim. Às minhas irmãs Mariana, Julia e Anita, por todo o amor dado. Aos meus tios, avôs, e primos, por todos os momentos de união e alegria.

À Simone Souza Dreher, por continuar me apoiando durante esta jornada e sempre me levantar nos momentos difíceis.

Aos meus companheiros de mestrado José Roberto e Ian, por todos os aprendizados e risadas.

Às minhas amigas Letícia C. K., Naiara, Bruna, Camila, Edyeines, Heloise, e Letícia A., pelos momentos de extrema alegria divididos, e principalmente pela compreensão nos momentos difíceis desta jornada.

Aos amigos do EMEA, pelo companheirismo e excelente trabalho prestado, que muito contribuiu para este estudo.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, cujo serviço e apoio prestados muito contribuíram, direta e indiretamente, para o desenvolvimento desta pesquisa.

*Aprendi que a vida é feita de dois lados.
Você precisa conhecer o lado torto para
conhecer o lado bonito.
Então, nesse sentido, todas as
experiências pelas quais nós passamos
são absolutamente válidas.*

Elis Regina

RESUMO

Pontes e viadutos são obras de infraestrutura de grande importância na facilitação do desenvolvimento social e econômico do território, sendo fundamental uma adequada gestão destas estruturas, o que faz com que a criação de sistemas de gerenciamentos de obras de arte especiais (OAEs) seja objeto de estudo em diversos países. O presente trabalho propõe um modelo de análise da vulnerabilidade de obras de arte especiais, que indica quais são as obras mais vulneráveis dada a simulação da ocorrência futura de diferentes cenários de deterioração da obra, auxiliando na tomada de decisão sobre a destinação de recursos financeiros para manutenção destas obras. Entende-se por vulnerabilidade a relação entre o esforço necessário para causar determinado dano e a sua consequência para a estabilidade e conservação da estrutura: quanto menor for o esforço necessário para provocar um dano e maior for a consequência resultante, maior será a vulnerabilidade da obra. A proposta apresentada foi desenvolvida a partir de parâmetros fornecidos pelo Modelo de Inspeção e Avaliação de OAEs da Universidade Federal do Paraná (UFPR), e estabelece uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural. O modelo desenvolvido tem como dados de entrada informações que indicam o estado de conservação dos elementos estruturais, coletadas em campo durante procedimento rotineiro de inspeção. Para demonstração da aplicação da análise são apresentados dois exemplos. O produto deste trabalho se destaca por ser um modelo que permite uma análise inovadora, a partir de dados de simples obtenção, e por permitir a simulação de cenários de degradação nas obras, enriquecendo o processo de decisão sobre a destinação de recursos para manutenção de OAEs.

Palavras-chave: Obra de arte especial. Ponte. Viaduto. Vulnerabilidade. Operação. Inspeção. Avaliação. Gestão. Manutenção.

ABSTRACT

Bridges and viaducts have a great importance in the social and economic development of territory, being essential a proper management of these structures, and this makes the development of bridge management systems an object of study in several countries. The present work proposes a vulnerability analysis model of bridges and viaducts, which indicates what are the most vulnerable works taking into account the simulation of future deterioration scenarios. The developed analysis helps in the decision of financial resources allocation to maintenance of these works. Vulnerability is understood as the relation between the effort required to cause a damage and its consequence for the structure stability and conservation: the less effort required to cause a damage and the greater the resulting consequence, bigger is the bridge vulnerability. The presented proposal was developed from parameters provided by the Bridge Inspection and Evaluation Model created by Federal University of Paraná, and establishes an analogy to Structural Vulnerability Theory. The developed model has as input data information that indicates the structural elements conservation state, collected during routine inspections. Two examples are presented to demonstrate the analysis application. The product of this work stands out because it is a model that allows an innovative analysis, from data obtained simply, and allows the simulation of future degradation scenarios in the bridges, helping the process of these structures management.

Keywords: Bridge. Viaduct. Vulnerability. Operation. Inspection. Evaluation. Management. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DA ESQUERDA PARA A DIREITA, DE CIMA PARA BAIXO: (A) PONTE, (B) VIADUTO, (C) PASSARELA, (D) PONTILHÃO.	22
FIGURA 2 – ESTÁGIOS DO CICLO DE VIDA DE OAEs.....	24
FIGURA 3 – SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE OAES APRESENTADOS.	28
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DE ANÉIS E ESFERAS ESTRUTURAIS.....	41
FIGURA 5 - EXEMPLO ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL (À ESQUERDA) E SEU MODELO HIERÁRQUICO (À DIREITA)	42
FIGURA 6 – METODOLOGIA DE PESQUISA	51
FIGURA 7 – COMBINAÇÕES ENTRE DANO DEMANDADO E CONSEQUÊNCIA	53
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DE APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE OAEs.....	67
FIGURA 9 – MORFOLOGIA DA PONTE USADA NO EXEMPLO: VISTA GERAL .	69
FIGURA 10 - MORFOLOGIA DA PONTE USADA NO EXEMPLO: VISTA GERAL COM OCULTAÇÃO DAS LAJES, ENCONTROS, E MUROS DE CONTENÇÃO	69
FIGURA 11 – RESUMO DO ÍNDICE DE PERFORMANCE DAS OBRAS ESTUDADAS	81

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - AVALIAÇÃO DO ESTADO GERAL DA MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA DE 2005 A 2015 *	18
GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DO INVESTIMENTO PÚBLICO TOTAL EM INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE	19
GRÁFICO 3 - COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA E DE SEUS TERMOS	59
GRÁFICO 4 – ÍNDICE DE PERFORMANCE POR PONTE VERIFICADO NA INSPEÇÃO; E ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE CADA CENÁRIO POR PONTE	82

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DA TEORIA DA VULNERABILIDADE ESTRUTURAL E O ÍNDICE PROPOSTO PARA OAES	62
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTADOS DE CONDIÇÃO DE CONSERVAÇÃO DEFINIDOS NO SISTEMA SIPUCOL.....	30
TABELA 2 – VALORES DE B	36
TABELA 3 - VALORES DE K1	37
TABELA 4 – VALORES DE K2	37
TABELA 5 – VALORES DE K3	37
TABELA 6 – VALORES DE K4	38
TABELA 7 – ELEMENTOS CONTEMPLADOS PELA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE OAES	63
TABELA 8 – MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS CONTEMPLADAS PELA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE OAES	64
TABELA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA E ELEMENTO PASSÍVEL DE OCORRÊNCIA.....	65
TABELA 10 – CONFIGURAÇÃO DE DANOS DA PONTE NO MOMENTO DA INSPEÇÃO.....	70
TABELA 11 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA LAJE	71
TABELA 12 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA APARELHO DE APOIO	72
TABELA 13 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA JUNTA DE DILATAÇÃO.....	72
TABELA 14 – ÍNDICES DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA A PONTE E SEUS ELEMENTOS	72
TABELA 15 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO A: AUMENTO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	73
TABELA 16 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO B: SOBRECARGA ESTRUTURAL.....	74
TABELA 17 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO C: AMBIENTE COM MUITAS CHUVAS	74
TABELA 18 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A NA LAJE.....	75
TABELA 19 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A NO APARELHO DE APOIO	75
TABELA 20 – CÁLCULO DA DEMANDA DE DANO PARA O CENÁRIO A NO APARELHO DE APOIO 1	75

TABELA 21 – CÁLCULO DA DEMANDA DE DANO PARA O CENÁRIO A NA LAJE	
1	76
TABELA 22 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A	77
TABELA 23 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO B	78
TABELA 24 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO C	79
TABELA 25 – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DOS CENÁRIOS SIMULADOS	79
TABELA 26 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS NAS PONTES.....	82
TABELA 27 – RANQUEAMENTO DAS PONTES SEGUNDO ÍNDICE DE	
VULNERABILIDADE (IV), POR CENÁRIO	84

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMEA	- Escritório Modelo de Engenharia Civil
IP	- Índice de performance
IV	- Índice de vulnerabilidade
NBR	- Norma Brasileira
OAE	- Obra de arte especial
SGO	- Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais do DNIT
SGP	- Sistema de gerenciamento de pontes
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	21
2.1.1	Ciclo de vida de OAEs.....	23
2.1.2	Processos de deterioração e manifestações patológicas em OAEs	25
2.2	SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	26
2.2.1	Modelos de avaliação de obras de arte especiais em sistemas de gerenciamento	29
2.3	MODELO DE AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EMEA/UFPR	34
2.4	TEORIA DA VULNERABILIDADE ESTRUTURAL	39
2.4.1	Anéis e esferas estruturais	40
2.4.2	Processo de agrupamento	41
2.4.3	Cenários de falha	44
2.4.4	Índice de vulnerabilidade.....	45
3	METODOLOGIA	48
3.1	CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA.....	48
3.2	ETAPAS DA PESQUISA.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE OAES	52
4.2	CRIAÇÃO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE DETERIORAÇÃO	63
4.3	EXEMPLOS.....	68
4.3.1	Exemplo 1: aplicação da análise de vulnerabilidade de OAEs.....	68
4.3.2	Exemplo 2: análise da vulnerabilidade de um conjunto de OAEs	80
5	CONCLUSÕES	86

REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE 1 – CONFIGURAÇÃO DE DANOS DAS PONTES UTILIZADAS NO EXEMPLO, NO MOMENTO DA INSPEÇÃO	92
APÊNDICE 2 – ANÁLISE MATEMÁTICA DOS PARÂMETROS OIRUNDOS DO EXEMPLO 2.....	98

1 INTRODUÇÃO

Pontes e viadutos são obras de infraestrutura viária de fundamental importância para o desenvolvimento social e econômico do território, uma vez que permitem a transposição de obstáculos permitindo e facilitando o trânsito de usuários. A necessidade por obras de tal tipo é acentuada em países com grande dependência do modal rodoviário, como é o caso do Brasil. Eventuais impedimentos do uso destas estruturas, que podem ocorrer em decorrência de interdição para reparo ou até mesmo em caso de colapso, resultam em gastos significativos devido ao acréscimo nas distâncias a serem percorridas nas rotas alternativas, à concepção de estruturas provisórias, e à reabilitação da estrutura original.

Neste contexto é fundamental que os órgãos responsáveis façam uma gestão adequada das obras de arte especiais (OAEs) sob sua responsabilidade, assegurando a realização de inspeções periódicas e de manutenção sempre que necessário. Para auxiliar a execução desta tarefa são desenvolvidos sistemas de gerenciamentos dedicados, que são alimentados com dados das obras e indicam, entre outras coisas, quais estruturas tem prioridade de reparo.

Os sistemas de gerenciamento de OAEs podem ser providos de diferentes modelos que atuam na determinação das obras prioritárias, e levam em consideração o estado de conservação da obra, a sua importância, os custos envolvidos na sua manutenção, a tendência de degradação prevista, entre outros aspectos. O presente estudo propõe um modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs, que considera o estado atual de conservação da obra e realiza a simulação de cenários futuros de degradação desta, permitindo o cálculo do índice de vulnerabilidade da OAE e constituindo, assim, uma informação auxiliar no processo decisório de definição das obras a serem reparadas. Deste modo, enquanto os modelos de avaliação de OAEs tradicionais fazem uma análise do estado presente de conservação da obra, o modelo de análise da vulnerabilidade aqui proposto faz considerações sobre o comportamento futuro destas.

Por vulnerabilidade adota-se, neste estudo, o entendimento dado pela Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, na qual uma estrutura é considerada vulnerável se no caso de ser atingida por um dano relativamente pequeno, este for capaz de causar consequências desproporcionalmente grandes (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

Tendo o conceito supracitado como premissa, a proposta de modelo de análise da vulnerabilidade de obras de arte especiais apresentada neste trabalho foi desenvolvida buscando estabelecer uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural. Além disto, o estudo foi fundamentado em pesquisa bibliográfica sobre o funcionamento de OAEs, os problemas que estas podem apresentar, os sistemas de gerenciamento e os modelos de avaliação existentes para este tipo de obra. Destaca-se, ainda, o uso do Modelo de Inspeção e Avaliação de OAEs desenvolvido pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que fornece subsídios para o modelo proposto.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo tem seus objetivos divididos em geral e específicos, e estes estão descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

Propor um modelo de análise da vulnerabilidade de obras de arte especiais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Propor uma formulação matemática para o cálculo do índice de vulnerabilidade de obras de arte especiais;
- Fazer a simulação de cenários de degradação em obras de arte especiais;
- Realizar uma análise crítica do modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs proposto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um sistema de gerenciamento de OAEs é uma ferramenta essencial para viabilizar uma gestão eficaz deste tipo de obra, de modo que diversos sistemas vêm sendo desenvolvidos desde a década de 90, em diferentes países, como é relatado no item 3.2 deste trabalho. Estas obras são projetadas para um período de uso que varia de 50 a 100 anos, no qual podem ocorrer mudanças substanciais nas

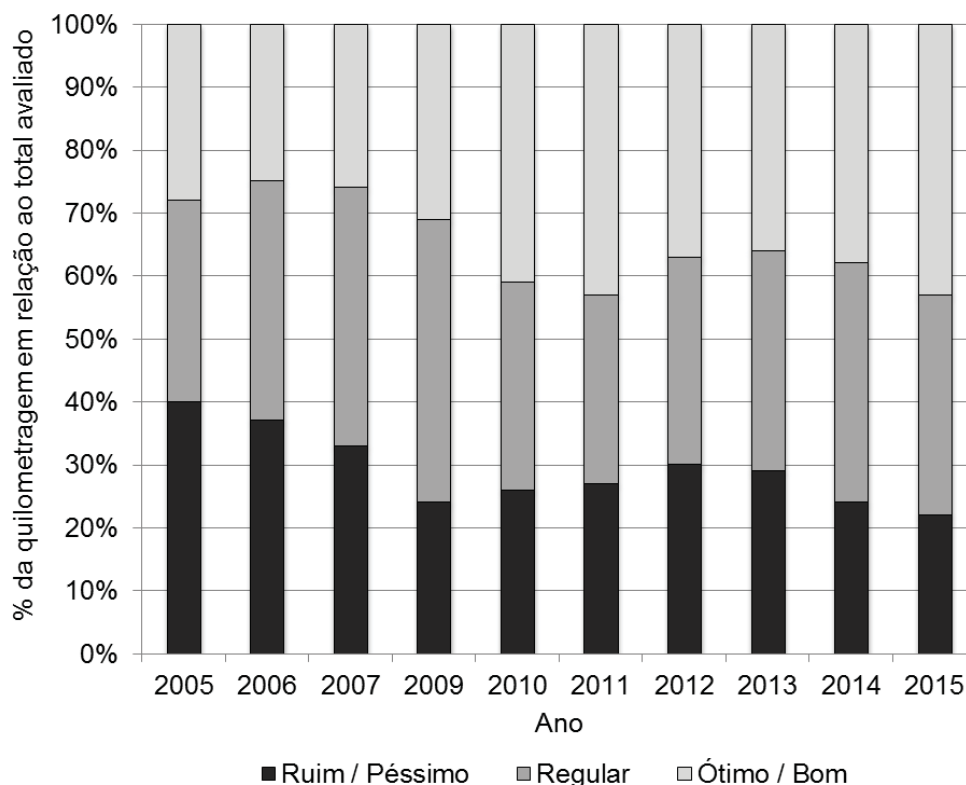
características locais, como o aumento de desenvolvimento econômico, o que altera as solicitações a que as obras são submetidas, podendo superar as previsões feitas na fase de projeto.

Minchin et al. (2006) destaca que isto é um problema que afeta até mesmo países desenvolvidos como os Estados Unidos, onde a solução encontrada foi investir no aprimoramento dos sistemas de gerenciamento e dos procedimentos de inspeção. Em países subdesenvolvidos o investimento em sistemas de gerenciamento também se mostra uma boa alternativa, tanto sob o ponto de vista técnico quanto financeiro. Tecnicamente esta solução se destaca por atuar na raiz do problema, organizando e padronizando o procedimento de gestão, e financeiramente se destaca principalmente por ser um investimento que reflete tanto nas obras já existentes quanto nas que virão a integrar a rede viária no futuro. Ainda, no viés econômico, um sistema de gerenciamento de OAEs permite prever com antecedência a ocorrência de possíveis problemas e, assim, ações de pequeno, médio e longo prazo podem ser estruturadas, buscando o ponto de equilíbrio ótimo entre despendimento de tempo e dinheiro.

Um dos principais produtos de um sistema de gerenciamento de OAEs é a listagem das obras com prioridade de reparo, o que requer o uso de modelos que façam essa análise de classificação da condição das obras (GHOLAMI; SAM; YATIM, 2013). Assim, é interessante o desenvolvimento de modelos que enriqueçam este processo de análise, e o modelo proposto neste estudo se justifica, em especial, por serem as análises sob a ótica da vulnerabilidade e da operacionalidade da ponte, abordagens inovadoras não constatadas em modelos já desenvolvidos.

Acrescenta-se a isso o fato de que cada localidade possui características e demandas específicas, e assim exige um sistema dedicado à sua realidade (RENS; NOGUEIRA; TRANSUE, 2005). Iniciativas como o termo de cooperação firmado entre DNIT e UFPR evidenciam a necessidade de melhorias no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) utilizado no Brasil, e neste sentido se mostra válido o desenvolvimento de um modelo que contemple as características nacionais, como faz a presente proposta. Apesar de não existirem dados específicos quanto ao estado de conservação das OAEs, a avaliação da malha rodoviária brasileira indica a precariedade deste modal, como é possível observar no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 - AVALIAÇÃO DO ESTADO GERAL DA MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA DE 2005 A 2015 *

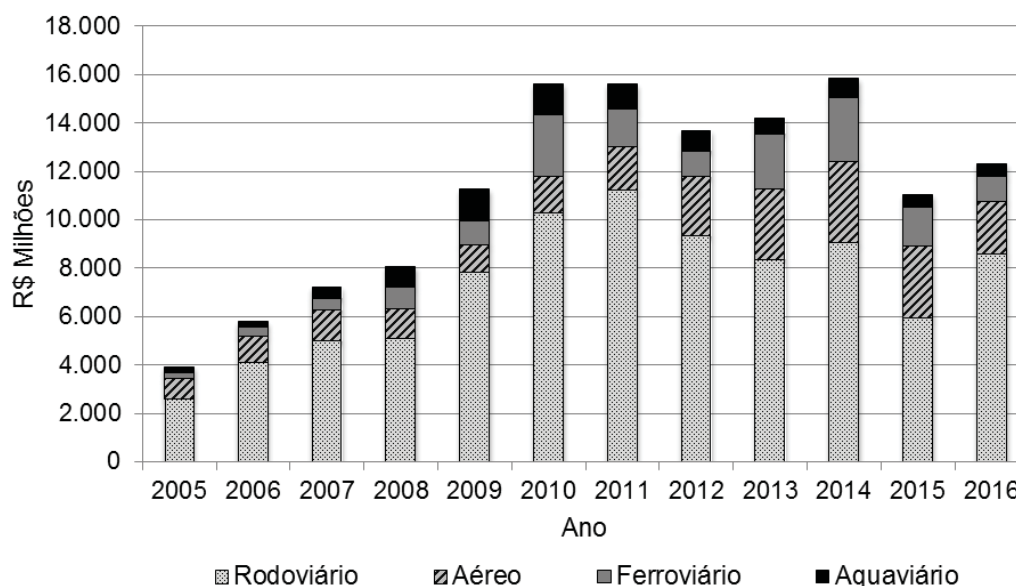


* Não foram divulgados dados de 2008.

FONTE: Adaptado de CNT (2016).

Por fim, endossando o já dito, em especial quanto ao panorama brasileiro, sendo a maior parte dos investimentos públicos em infraestrutura de transporte destinada ao modal rodoviário, como é possível observar no GRÁFICO 2, é imperativo o uso de ferramentas de gestão que auxiliem na tomada de decisão quanto à destinação destes recursos dentro do modal rodoviário. Esta problemática vai além da esfera técnica, configurando-se como uma obrigação do governo perante a sociedade.

GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DO INVESTIMENTO PÚBLICO TOTAL EM INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE



FONTE: Adaptado de CNT (2017).

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O modelo proposto neste estudo utiliza como dados de entrada informações relativas ao estado de conservação da OAE, tal como danos existentes e respectivas magnitudes, não contemplando características estruturais dos elementos, como rigidez, grau de liberdade, e outros. Ainda neste sentido, observa-se que os tipos de danos apresentados neste trabalho são característicos de OAEs constituídas de concreto armado ou protendido situadas nos estados do Paraná e Santa Catarina, conforme verificado através de inspeções realizadas pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao assunto e são descritos os objetivos e a justificativa para desenvolvimento do presente estudo.

No segundo capítulo é apresentada a revisão da literatura pertinente à pesquisa, iniciando pela abordagem de conceitos gerais referentes à OAEs, como tipos de morfologia, elementos e sistemas componentes, ciclo de vida, e ainda os

mecanismos de degradação e as manifestações patológicas mais frequentes nestas estruturas. Na sequência é apresentado um panorama geral de sistemas de gerenciamento e modelos de avaliação de OAEs existentes. Por fim, ainda no segundo capítulo, são expostos dois conteúdos de relevantes para compreensão do modelo proposto no presente trabalho: o Modelo de Inspeção e Avaliação de OAEs EMEA/UFPR e a Teoria da Vulnerabilidade Estrutural.

O terceiro capítulo é dedicado à descrição da metodologia de pesquisa e trabalho estabelecida para desenvolvimento deste estudo.

O quarto capítulo é destinado à apresentação dos resultados, onde consta não apenas o desenvolvimento do modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs, mas também exemplos de aplicação em pontes e interpretação dos resultados.

Concluindo o trabalho, no quinto capítulo são feitas considerações sobre os resultados atingidos, suas limitações, e propostas para estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico que embasa o desenvolvimento do presente estudo, e que também tem como objetivo familiarizar o leitor com o tema explorado. Primeiramente, são abordados conceitos gerais sobre OAEs; na sequência são apresentados alguns sistemas de gerenciamento e avaliação de OAEs, com destaque para o Modelo EMEA/UFPR, e finalmente é abordada a Teoria da Vulnerabilidade Estrutural.

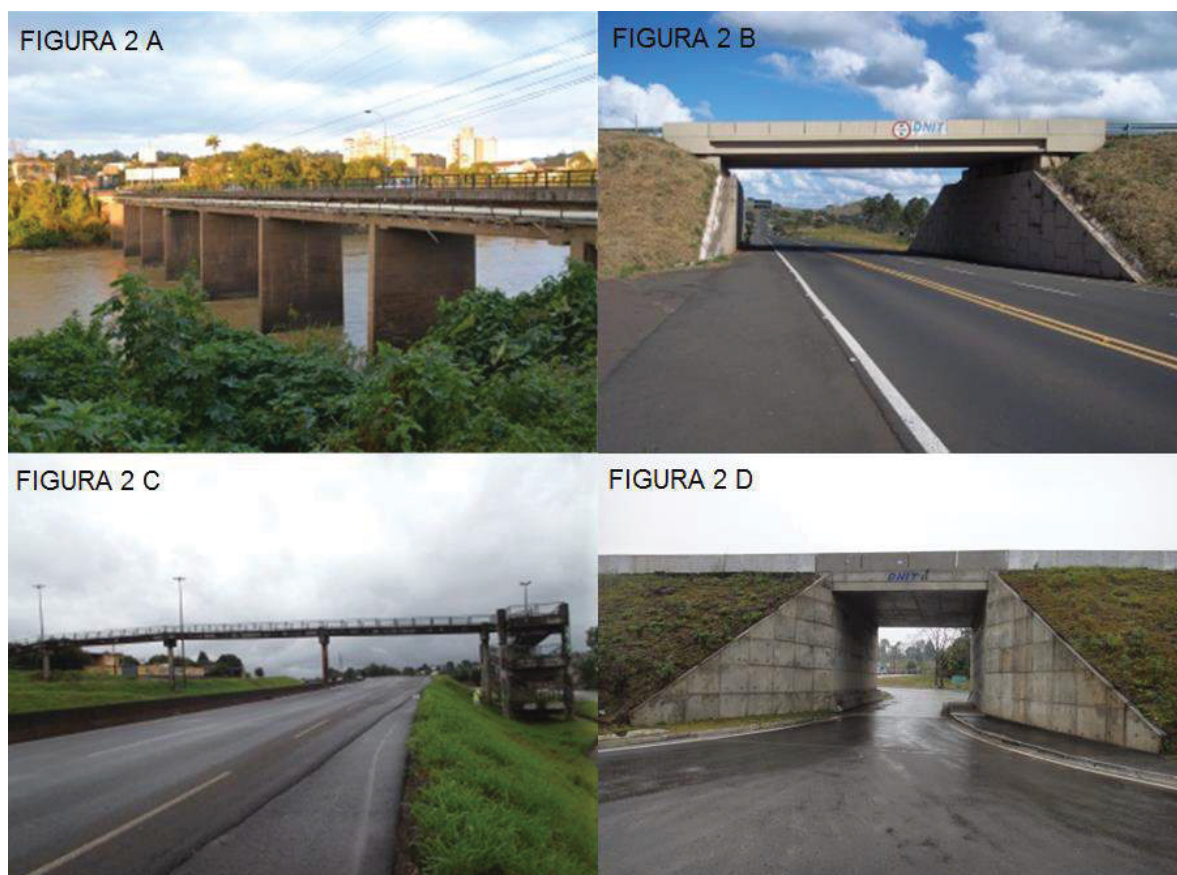
2.1 OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

Inicialmente, as obras destinadas à transposição de obstáculos, como rios e vales, para dar continuidade a uma via, eram produzidas por artífices, que dotados de criatividade e lançando mão de métodos empíricos, elevavam esse processo de construção às condições de elaboração de verdadeiros trabalhos de arte. Deste fato surge o uso do termo “obra de arte” para denominar construções como pontes, viadutos, bueiros, canaletas, entre outros. Neste trabalho é considerado como obra de arte especial (OAE) o que define a NBR 9452 (ABNT, 2016): pontes, pontilhões, viadutos e passarelas; sendo os dispositivos de drenagem e bueiros enquadrados como obras de arte correntes (OAC), conforme também é considerado pelo DNIT (DNIT, 2017).

Assim, a NBR 9452 (ABNT, 2016), que trata da inspeção de pontes, viadutos, passarelas e pontilhões de concreto, define estas obras como:

- a) Ponte: estrutura que estabelece a continuidade de uma via frente à transposição de um obstáculo constituído por um canal aquífero, como rio, mar, lago, e outros (FIGURA 1 A);
- b) Viaduto: estrutura que estabelece a continuidade de uma via frente à transposição de um obstáculo constituído por rodovia, ferrovia, vale, contorno de encosta, e outros semelhantes (FIGURA 1 B);
- c) Passarela: estrutura que estabelece a continuidade de uma via destinada exclusivamente à travessia de pedestres e ciclistas, frente a obstáculos como canais aquíferos e rodovias (FIGURA 1 C);
- d) Pontilhão: viaduto ou ponte com vão único de comprimento menor ou igual a seis metros (FIGURA 1 D).

FIGURA 1 – DA ESQUERDA PARA A DIREITA, DE CIMA PARA BAIXO: (A) PONTE, (B) VIADUTO, (C) PASSARELA, (D) PONTILHÃO.



FONTE: EMEA (2016 a).

Para fins didáticos é possível estabelecer diferentes classificações para as OAEs, entretanto a maioria destas categorizações não é contemplada em normas técnicas e não é consenso entre os profissionais da área, podendo, assim, ter limites e intervalos de valores variáveis em cada literatura existente. Algumas classificações possíveis são quanto à natureza do obstáculo de transposição (canal aquífero, rodovia, ferrovia, vale, etc.), à natureza do tráfego que suporta (rodoviária, ferroviária, rodoferroviária, aeroviária, passarela, ponte canal ou mista), aos materiais constituintes (concreto armado, concreto protendido, aço, madeira, alvenaria, concreto simples, ou mista), sistema estrutural da superestrutura (em laje, em viga, em pórtico, em arco, pênsil, estaiada, etc.), ao processo executivo (moldagem in loco, pré-moldado, balanços sucessivos, etc.).

De maneira geral, uma OAE pode apresentar os seguintes elementos estruturais: laje, junta de dilatação, viga longitudinal, viga transversal, travessa, estruturas de contraventamento, aparelho de apoio, pilar, encontro, estruturas de

retenção do aterro, e fundação. Estes elementos, que dão forma às pontes e viadutos, podem ser divididos em componentes da superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, segundo a sua localização e função que exercem. Todavia, nem sempre essa divisão é aplicável, pois em algumas estruturas não há uma separação nítida entre os elementos.

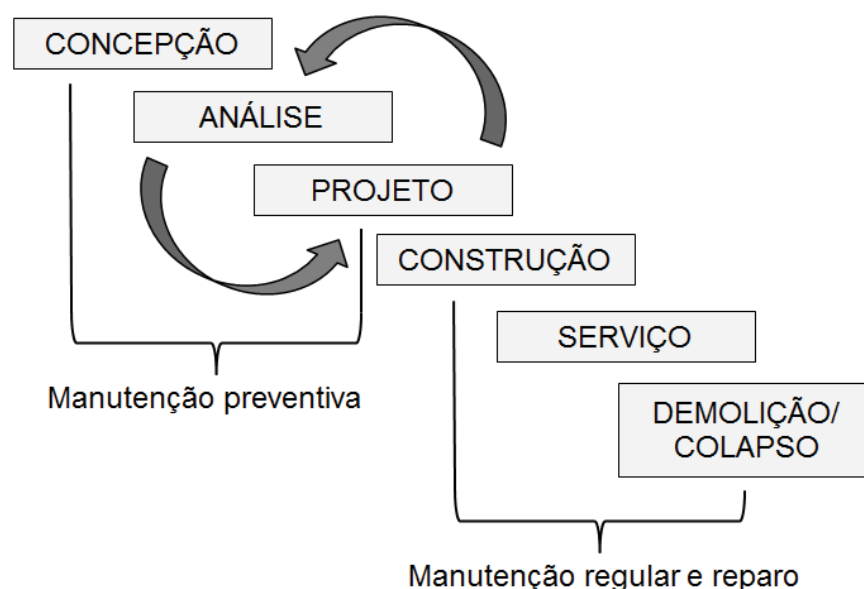
A superestrutura compreende os elementos que estão localizados acima dos apoios de pilares e encontros, como as vigas longitudinais, as vigas transversais e a laje; e são esses elementos os responsáveis por receber as cargas decorrentes do tráfego e as transferir para os pilares ou encontros. Já a mesoestrutura compreende as estruturas intermediárias da ponte, como pilares, aparelhos de apoio, travessas, elementos de contraventamento e encontros, e estes elementos têm como função transferir as cargas recebidas pela superestrutura para as fundações. Por fim, a infraestrutura diz respeito aos elementos de sustentação da ponte, as fundações, que são responsáveis pela transferência das cargas provenientes dos pilares para o solo.

Uma OAE também é constituída por outros elementos que não exercem função estrutural, e sim atuam proporcionando a funcionalidade e conservação da estrutura, e a segurança e conforto dos usuários. São esses os dispositivos de segurança, pavimento, elementos de sinalização, e sistema de drenagem.

2.1.1 Ciclo de vida de OAEs

O ciclo de vida de uma OAE pode ser dividido em 6 fases, segundo Ryall (2001 apud GHOLAMI; SAM; YATIM, 2013), conforme esquematizado na FIGURA 2. A obra inicia com a sua concepção, onde se deve buscar um equilíbrio entre a solução estrutural adotada, a estética, e os custos envolvidos; na sequência tem-se a análise destas concepções iniciais e sua efetiva tradução em projeto, processo que é cíclico (análise – projeto) até que se alcance uma solução satisfatória. Durante estas três primeiras etapas deve ocorrer uma gestão preventiva da obra, observando possíveis pontos críticos de aspectos relacionados ao funcionamento e durabilidade da obra, e realizando as correções necessárias no projeto.

FIGURA 2 – ESTÁGIOS DO CICLO DE VIDA DE OAEs



FONTE: Adaptado de Ryall (2001 apud GHOLAMI; SAM; YATIM, 2013).

As fases seguintes são a de construção, de serviço, e finalmente de inutilização da obra, através de demolição, caso a obra já não tenha entrado em colapso. Durante o processo de construção ainda podem ocorrer alterações no projeto, caso sejam verificados pontos conflitantes com a previsão de vida útil pretendida para a obra, continuando assim a gestão preventiva. Passada esta etapa tem início a manutenção regular e a realização dos reparos necessários.

Durante a fase de serviço tem início o processo de deterioração da estrutura, que ocorre, de modo geral, pelo próprio uso e pela ação do tempo. Quanto ao uso destaca-se a deterioração decorrente do tráfego de veículos; e com relação ao tempo e a exposição ao ambiente, tem-se as alterações climáticas como a ocorrência de chuvas, variações de temperatura e umidade, ciclos de gelo e degelo, e poluição (RENS; NOGUEIRA; TRANSUE, 2005).

Neste processo de degradação, que é completamente natural às obras expostas ao ambiente, destinadas a longos períodos de uso e submetidas à cargas elevadas, podem existir pontos críticos onde o desempenho da obra tem um decaimento grande e são necessárias, além da rotina de manutenção, reparações pontuais (MINCHIN et al., 2006).

Segundo Klatter, Vrouwenvelder e Van Noortwijk (2009), a manutenção pode ser de dois tipos: preventiva, que ocorre antes da falha, e corretiva, que ocorre após a falha. A opção por realizar apenas a manutenção corretiva pode ser uma

estratégia de gestão se as consequências da falha da estrutura forem baixas, caso contrário, a realização da manutenção preventiva é imperativa.

2.1.2 Processos de deterioração e manifestações patológicas em OAEs

As OAEs estão sujeitas à ação de diversos mecanismos de degradação e, consequentemente, podem apresentar variadas manifestações patológicas. Cabe destacar que “mecanismo de degradação” é um fenômeno que se desenvolve na estrutura, e as suas consequências, ou seja, as alterações que provoca na estrutura, são chamadas “manifestações patológicas”. Por exemplo, a fissura é uma manifestação patológica (sintoma) que pode ter sido provocada por diversos mecanismos de degradação (doença), entre esses, a corrosão de armaduras. A ciência responsável por estudar o conjunto de fatores que geram as anomalias e as alterações trazidas por estas à estrutura é denominada “patologia” (ABNT, 2016).

O Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004) apresenta as principais causas de degradação de estruturas de concreto, que em muitos casos também se aplicam às deteriorações nos demais elementos de OAEs. São essas:

- a) Projeto inadequado (seja na concepção, no dimensionamento, ou no detalhamento e especificações);
- b) Ausência do controle de qualidade durante a construção;
- c) Manutenção inexistente ou inadequada;
- d) Uso incorreto da estrutura (ex.: trânsito de sobrecargas não previstas em projeto);
- e) Eventos químicos (ex.: presença de ácidos e sais no ambiente);
- f) Eventos físicos (ex.: ação do vento, variações de temperatura);
- g) Eventos mecânicos (ex.: choque de veículos);
- h) Eventos biológicos (ex: desenvolvimento de vegetações).

No processo de inspeção e análise de uma obra que apresenta problemas, Souza e Ripper (1998) alertam sobre a importância de se saber quais as possíveis causas das manifestações patológicas existentes, a fim de que se possa prescrever uma solução adequada e garantir que os problemas não voltem a deteriorar a estrutura.

Como descrito no início desta seção, as manifestações patológicas são deficiências que as construções podem apresentar em função da ação de processos

de deterioração como os citados no parágrafo anterior. As principais manifestações patológicas que podem ocorrer em OAEs são (EMEA, 2016 b):

- a) Manifestações patológicas em elementos de concreto armado: fissuração, desagregação, desgaste superficial, vazios de concretagem, exposição de armaduras, manchamento, eflorescência, desalinhamento, desaprumo, deformação excessiva, e deslocamento;
- b) Danos no sistema de drenagem: inexistência do sistema de drenagem, drenos em quantidade ou tamanho insuficiente, entupimento dos drenos, deficiência nas pingadeiras e buzinos;
- c) Danos no pavimento: fissuração, deformação, desagregação, afundamento, ondulação, escorregamento, exsudação, desgaste, buraco, e remendos mal executados;
- d) Danos em juntas de movimentação: obstrução, desnível elevado, abertura excessiva, e recapeamento irregular;
- e) Danos em aparelhos de apoio: fissuração, oxidação do aço, ausência de contato, esmagamento, e deslocamento;
- f) Danos em aterros de acesso: recalque, ruptura, e erosão;
- g) Danos em fundações: recalque e descalçamento.

2.2 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

A gestão de OAEs consiste na administração destas obras, normalmente apoiada em um procedimento sistematizado que prescreve ações de manutenção e reparo com base no conhecimento das condições e restrições das obras (YANEV, 2007 apud AKGUL, 2013). Essa gestão deve ser iniciada ainda na fase de projeto da obra, e acompanhá-la até o fim da sua vida útil (RYALL, 2001 apud AMINI; NIKRAZ; FATHIZADEH, 2015).

Para auxiliar a gestão de OAEs são utilizados sistemas de gerenciamento dedicados a este tipo de obra de infraestrutura, difundidos na literatura técnica como *bridge management system* (BMS) ou sistema de gerenciamento de pontes (SGP). Este tipo de ferramenta tem como principais objetivos indicar as obras com prioridade de reparo e a escolha ótima para investimento e realização de melhorias nas obras da rede viária (OECD, 1992 apud SALEH; MANSOUR; ABBAS, 2013). Por escolha ótima entende-se o equilíbrio entre o alcance do máximo desempenho

possível para a rede viária com um despendimento mínimo de recursos financeiros. Cada local exige um sistema que esteja em consonância com a sua realidade, uma vez que a escolha ótima deve estar alinhada, entre outros fatores, com as políticas da agência, suas prioridades, objetivos de longo prazo, restrições orçamentárias, características locais, tipo e nível de degradação dos componentes, e outras considerações estratégicas (PELLEGRINO; PIPINATO; MODENA, 2011).

De modo geral, pode-se dizer que existem três etapas fundamentais em sistemas de gerenciamento de OAEs: avaliação das condições da ponte, modelagem do comportamento futuro da deterioração, e decisões sobre manutenção, reparo, e reabilitação da obra (SHIROLÉ, 2010). Para desempenhar tais tarefas os sistemas podem ser entendidos como um conjunto de módulos que possuem diferentes funções e interagem entre si, tais como: inventário, inspeção, manutenção, recursos financeiros, gerenciamento, banco de dados, previsão de performance, e referenciamento geográfico.

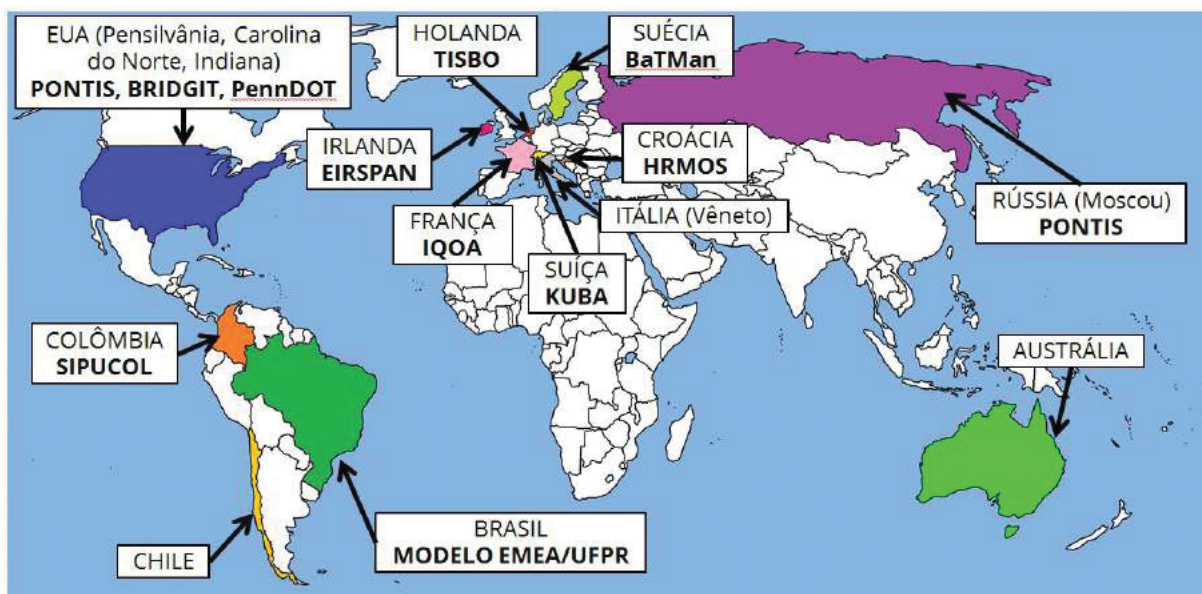
Nesse contexto, cabe destacar a relevância do procedimento de vistoria das obras, uma vez que é a principal fonte de dados para alimentação desses sistemas. A inspeção de pontes deve ser um procedimento sistematizado de coleta de informações sobre a obra, visando registrar o seu estado atual de conservação. Assim, a capacitação da equipe técnica é de fundamental importância, não apenas para a adequada observação e diagnóstico das pontes, mas também para o correto uso das ferramentas do SGP.

Outro aspecto fundamental de um sistema de gerenciamento de OAEs é o modelo de avaliação das condições da obra que, de modo geral, define como os resultados da inspeção devem ser coletados e posteriormente analisados. Segundo levantamento feito pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP, 2007 apud AKGUL, 2013) modelos de avaliação que categorizam os danos e atribuem notas à cada categoria são bastante utilizados. Outra opção é uma caracterização mais completa dos danos, registrando sua gravidade, extensão, intensidade, importância e urgência de reparo; e integração destes fatores através de fórmulas matemáticas que resultam em um indicador da condição da ponte. Ressalta-se que a esse processo pode e deve-se acrescentar outros fatores pertinentes a avaliação de OAEs através de ponderações, que podem ser dadas por métodos numéricos, estatísticos, probabilísticos ou comparativos (AMINI; NIKRAZ; FATHIZADEH, 2015).

Através dos modelos de avaliação é possível compor um *ranking* segundo o grau de deterioração das obras e determinar quais tem prioridade de reparo (AKGUL, 2013). Rashidi, Samali e Sharafi (2015) pontuam que esta prática comum de dar prioridade de reparo para as obras com piores condições de conservação não necessariamente maximiza os benefícios para a rede viária ou reduz o custo do ciclo de vida da ponte. Todavia, Klatter, Vrouwenvelder e Van Noortwijk (2009) observam que em casos em que não se tem modelos de deterioração confiáveis, adequados à realidade local, sistemas de classificação da condição da OAE são uma alternativa interessante.

Isto posto, são apresentados na sequência alguns sistemas de gerenciamento de OAEs e modelos de avaliação utilizados em diferentes países (FIGURA 3). É importante observar que alguns estudos não dizem respeito à sistemas necessariamente implementados em outros países, mas sim à pesquisas desenvolvidas nestes lugares e que refletem o que os pesquisadores e profissionais pensam e consideram importante.

FIGURA 3 – SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE OAES APRESENTADOS.



FONTE: A Autora (2018).

2.2.1 Modelos de avaliação de obras de arte especiais em sistemas de gerenciamento

Na revisão sistemática da literatura realizada, conforme descrito na seção de metodologia, foram encontrados sistemas de gerenciamento e modelos de avaliação de OAEs utilizados nos Estados Unidos da América, Colômbia, Chile, Holanda, Suíça, Irlanda, Suécia, Croácia, França, Itália, Moscou, e Austrália.

Um dos primeiros países a tornar obrigatório o uso de sistemas de gerenciamento de OAEs para as obras do seu território foram os Estados Unidos da América em 1991 (MINCHIN et al., 2006). Deste modo, a agência norte-americana de Administração de Rodovias Federais (*Federal Highway Administration – FHWA*) desenvolveu o programa PONTIS, que se popularizou e passou a ser usado em outros países. Um dos destaques do programa, e que permitiu a sua adoção em outros países, é a possibilidade de personalizá-lo segundo necessidades locais, permitindo alterações em *layouts* de tela, formulários de entrada de dados, relatórios, tipos de elementos, alternativas de tratamento para pontes, e introdução de modelos de deterioração. Uma das cidades que faz uso do PONTIS é Moscou, entretanto foram feitas alterações no catálogo de elementos do sistema, nos métodos de análise da estrutura, na previsão de custos, e na otimização de soluções (KUZNETSOV et al., 2003).

No PONTIS os elementos estruturais da obra são caracterizados pelas suas condições de conservação, e em decorrência disto o sistema fornece um índice de saúde da ponte, sua classificação de condição NBI (*United States National Bridge Inventory*) e sua classificação de suficiência (MINCHIN et al., 2006). O programa seleciona as alternativas de reparo para a obra de modo otimizado através do uso de Cadeias de Markov, que conduzem à minimização dos custos a longo prazo (PONTIS, 2005 apud AKGUL, 2013).

Apesar da grande popularidade do PONTIS, alguns estados norte-americanos utilizam o programa BRIDGIT, desenvolvido em 1985 pelo Programa Cooperativo Nacional de Pesquisa Rodoviária (NCHRP) nos EUA (PELLEGRINO; PIPINATO; MODENA, 2011). O sistema possui recursos semelhantes aos do PONTIS, mas um destaque do programa, segundo alguns usuários, está no fato de que o menu e as telas do seu sistema o tornam mais fácil de usar se comparado ao PONTIS (CZEPIEL, 1995 apud MINCHIN et al., 2006).

Outros estados norte-americanos, como Pensilvânia, Carolina do Norte e Indiana, optaram por desenvolver o seu próprio SGP. Na Pensilvânia o sistema PennDOT está em uso desde 1986, e avalia os elementos estruturais da OAE classificando-os segundo suas condições de conservação em uma escala de 0 a 100, e então são feitos encaminhamentos para serviços de manutenção, reparo ou reabilitação, considerando as relações custo-benefício envolvidas. Na Carolina do Norte o sistema classifica os elementos estruturais segundo uma escala definida no NBI, e faz análises como a determinação do custo anual do usuário para uma ponte, e dos custos decorrentes de acidentes.

O sistema usado em Indiana é composto por quatro modelos diferentes que permitem determinar a ação ideal para melhorar a condição de uma estrutura com base na condição de seus elementos. As OAEs são classificadas segundo a sua condição de conservação, custo do ciclo de vida, e impacto na segurança do ambiente onde está inserida. Seguindo estas classificações as pontes são avaliadas sob duas óticas diferentes que norteiam a estruturação dos planos de manutenção: a primeira dá prioridade às pontes em piores condições, e a segunda leva em consideração os recursos financeiros disponíveis e como estes podem ser usados para maximizar o nível de serviço da rede viária (CZEPIEL, 1995 apud MINCHIN et al., 2006).

Ainda no continente americano, foi desenvolvido na Colômbia o sistema de gestão de OAEs SIPUCOL. A avaliação da obra é feita através do registro dos tipos e extensão dos danos existentes, dos elementos afetados, e da necessidade de reparo, inspeção especial, manutenção ou limpeza (MUÑOZ; GÓMEZ, 2013). Os elementos, estruturais ou funcionais, podem ser avaliados conforme classificação apresentada na TABELA 1.

TABELA 1 - ESTADOS DE CONDIÇÃO DE CONSERVAÇÃO DEFINIDOS NO SISTEMA SIPUCOL

Nota	Descrição
0	Sem dano ou dano insignificante.
1	Dano pequeno que não necessita reparo.
2	Dano existente porém o elemento desempenha a função projetada.
3	Dano significativo necessitando reparo.
4	Dano severo necessitando reparo imediato.
5	Dano extremo com falha total ou risco de falha total do elemento.

FONTE: MUÑOZ; GÓMEZ (2013).

Valenzuela et al. (2010) propôs o índice de avaliação de OAEs descrito na Equação 1, intitulado *Integrated Bridge Index* (IBI), que é adequado à realidade chilena. Os pesos que ponderam cada parâmetro dentro da equação foram calibrados através de inspeções visuais, pesquisas com especialistas e análises de regressão. O valor mínimo possível para o índice, que indica uma condição crítica da obra, é 1, e o valor máximo, que reflete a melhor condição possível, é 10 (AMINI; NIKRAZ; FATHIZADEH, 2015).

$$IBI = -1,411 + 1,299 (BCI) + 0,754 (HV) + 0,458 (SR) - 0,387 (SI) \quad (1)$$

onde:

IBI – índice de avaliação da obra;

BCI – condição de conservação dos elementos. Obtido através de equação que é função da importância estrutural do elemento, do material que o constitui (concreto pré-moldado – 1, concreto armado – 2, aço – 3, madeira – 4, outro – 1,5), e dos danos que apresenta (avaliação similar à TABELA 1);

HV – vulnerabilidade hidráulica da obra. Relacionada à probabilidade de falha da obra em função das características do rio: probabilidade inexistente – 5; pouco provável – 4; provável – 3; muito provável – 2; falha iminente – 1;

SR – risco sísmico da obra. Relacionado à probabilidade de falha da obra em função de carga sísmica (ex: terremoto): risco ausente – 5; risco baixo – 4; risco médio – 3; risco alto – 2; risco muito alto – 1;

SI - importância estratégica da obra. Obtida através de equação que é função da rota alternativa (rota paralela – 1, próxima – 2, distante – 3, muito distante – 4, inexistente – 5), do volume de tráfego (baixo – 1, médio – 3, alto – 5), das atividades econômicas suportadas pela estrada, da sua largura (insatisfatória – 1, satisfatória – 3, muito satisfatória – 5) e comprimento (muito curta – 1, curta – 2, regular – 3, longa – 4, muito longa – 5), e da restrição de carga (restrição alta – 1, média – 3, inexistente – 5).

Partindo para o continente europeu, um sistema de gestão de OAEs de destaque é o TISBO (*Netherlands Infrastructure Maintenance Management System*), desenvolvido pelo governo holandês. Este sistema é descrito como proativo e não reativo, uma vez que para indicar as ações de manutenção este considera resultados obtidos de inspeções anteriores (BAKKER; VOLWERK, 2003).

Na Suécia o SGP utilizado é o BaTMan (*Bridge and Tunnel Management*), sistema bastante difundido na Europa. Durante a inspeção os componentes da ponte são avaliados e enquadrados em uma das quatro classes de condição previstas no modelo que toma como base o tempo dentro do qual o elemento provavelmente apresentará defeito: 0 - função defeituosa depois de 10 anos, 1 - função defeituosa dentro de 10 anos, 2 - função defeituosa dentro de 3 anos, 3 – já apresenta função defeituosa (SAFI et al., 2013).

Na Suíça, o SGP utilizado é o KUBA, onde os elementos que constituem a ponte são avaliados visualmente e classificados em um destes cinco estados de conservação: bom (sem dano), aceitável (corrosão, deslocamento, e pequenas fissuras), danificado (exposição da armadura com redução da seção), condição ruim (perda significativa da seção das armaduras), alarmante (danos estruturais graves) (KUBA-MS-TICINO, 1998; apud ROELFSTRA et al., 2004). Para simular o comportamento futuro dos elementos é estabelecida uma relação entre a sua idade e o seu estado atual de conservação, e a evolução da sua condição é obtida empiricamente através de análises estatísticas e do método das Cadeias de Markov (ROELFSTRA et al., 2004). Entretanto, visto que as previsões obtidas através das Cadeias de Markov nem sempre são confiáveis, e que em muitos casos não se tem um histórico de dados suficiente para realizar análises estatísticas, Roelfstra et al. (2004) sugerem uma abordagem alternativa que considera os fenômenos físico-químicos envolvidos na deterioração dos elementos. Os autores se dedicaram ao estudo da corrosão induzida por cloretos, um dos mecanismos de deterioração mais comuns na Suíça, modelando matematicamente seu comportamento ao longo do tempo, e alinharam critérios decorrentes disto às análises tradicionalmente realizadas pelo KUBA.

O sistema de gerenciamento de pontes que era utilizado na Irlanda, o DANBRO, foi modificado em 2001, com o intuito de centralizar a gestão das estruturas do sistema rodoviário nacional, e passou a se chamar EIRSPAN (COLLINS; BREEN, 2006). Os elementos da obra são classificados em estados de condição de conservação semelhantes aos apresentados na TABELA 1. Um diferencial da prática de gestão de pontes na Irlanda é o intervalo de tempo entre as inspeções rotineiras, que pode ser de até seis anos, prazo que pode ser considerado alto comparando com o Brasil, por exemplo, onde o tempo limite entre a realização de uma inspeção e a subsequente é de 2 anos.

O SGP adotado na Croácia é o HRMOS, baseado no sistema DANBRO. Cada um dos elementos componentes da obra é avaliado em uma escala de 0 a 5 similar a TABELA 1, e os danos são caracterizados segundo a sua extensão, a importância dos elementos danificados, e a estimativa de propagação de dano (RADIĆ; BLEIZIFFER; TKALČIĆ, 2005).

Pellegrino, Pipinato e Modena (2011) propuseram um modelo para aplicação em obras situadas na região italiana de Vêneto. Cada elemento da obra é avaliado segundo um indicador de suficiência (ESR) (Equação 2). A obra tem sua suficiência global avaliada através de algumas correlações que envolvem as suficiências individuais reais dos elementos, as suficiências mínimas que estes poderiam apresentar, e ainda o cálculo de um fator de confiança.

$$ESR = CF \times LF \times (RT \times TI \times NBI \times AF) \quad (2)$$

onde:

ESR – índice de suficiência do elemento;

CF – fator de condição de conservação do elemento. Índice que varia de 1 a 5, similar ao apresentado na TABELA 1;

LF – fator de localização dos danos. Relacionado à importância do elemento, esse índice varia de 5 (importância máxima) a 10 (importância mínima);

RT – tipo de estrada a qual a obra pertence (auto estrada – 0,80; estrada nacional – 0,90; estrada estadual - 0,95; estrada secundária - 1,00);

TI – índice de tráfego da estrada (alto – 0,90; médio – 0,95; baixo 1,00);

NBI – importância da obra na rede viária. Relacionado à rota alternativa existente: desvio longo em estrada inadequada – 0,96; desvio curto em estrada inadequada ou longo em estrada adequada – 0,98; desvio curto em estrada adequada – 1,00;

AF – idade da obra. Relacionado ao ano de construção da obra: antes de 1900 – 0,97; 1900 à 1945 – 0,98; 1946 à 1970 – 0,99; a partir de 1971 – 1,00.

Por fim, Rashidi, Samali e Sharafi (2015) propuseram um modelo de avaliação para integrar um SGP adequado à realidade das OAEs australianas, onde as informações obtidas na inspeção são relacionadas em um índice de ranqueamento (Equação 3) que visa determinar a prioridade de intervenção na obra:

$$IP = 0,6 (SE) + 0,2 (FE) + 0,2 (CIF) \quad (3)$$

onde:

IP – índice de prioridade;

SE - eficiência estrutural. Parâmetro obtido através de uma equação que é função das características dos elementos que compõem a obra (material constituinte, importância estrutural, e condição de conservação), e de um fator de casualidade que é função do tempo de serviço da obra, da agressividade ambiental, da classe da estrada, e da qualidade da inspeção).

FE – eficiência funcional. Parâmetro obtido através de uma equação que é função das seguintes características da obra: capacidade de carga, gabarito vertical, largura, barreiras de segurança, e sistema de drenagem;

CIF - fator de impacto para o cliente. Parâmetro varia de 1 a 4, sendo: 1 – baixo, 2 – médio, 3 – alto, e 4 – muito alto.

2.3 MODELO DE AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EMEA/UFPR

O Modelo de Avaliação da Performance de OAEs desenvolvido pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), foi elaborado com o objetivo de apresentar uma metodologia que fosse capaz de analisar as condições estruturais e funcionais de pontes e viadutos, possibilitando um ranqueamento das obras. Assim o modelo EMEA/UFPR “busca acolher as informações obtidas nas inspeções e parametrizar, em termos de índice numérico, o grau de deterioração da OAE” (EMEA, 2016 b, p.9) de modo que esta informação possa ser usada, por exemplo, para determinar as obras com prioridade de intervenção.

A performance destas estruturas está relacionada ao modo como funcionam e ao seu comportamento às cargas à que estão sujeitas, de modo que a performance é dada pela interação de múltiplos fatores como projeto, morfologia, materiais constituintes, características ambientais, processos de deterioração incidentes, capacidade de carga, volume de tráfego, desempenho do sistema de drenagem, rotinas de manutenção preventiva, entre outros EMEA (2016 b). A

observância destes critérios atua a favor da segurança e da operacionalidade da ponte, além de minimizar os impactos no ambiente, na estética, e o risco de colapso.

O modelo é alimentado pelos dados coletados sobre cada dano existente na estrutura durante a o procedimento de inspeção da OAE. As informações que caracterizam cada dano são: o tipo, a intensidade, a sua propagação em outros elementos da mesma família, e a urgência de reparo requerida. Estas informações são traduzidas em cinco parâmetros que alimentam a equação de cálculo do Índice de Performance Absoluto (IP_{ABS}), apresentada na Equação 4, que é baseada em modelos matemáticos utilizados na Áustria e na Eslovênia (COST 345, 2007; CEB, 1998) para inspeção e avaliação de estruturas rodoviárias, e foi adaptada para a realidade brasileira.

$$IP_{ABS} = \sum V_D = \sum B_i \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \quad (4)$$

onde:

IP_{ABS} = índice de performance absoluto;

V_D = valor do dano;

B_i = fator associado ao tipo de dano (função da sua gravidade) (TABELA 2);

K_{1i} = fator associado ao elemento afetado (função da sua importância) (TABELA 3);

K_{2i} = fator indicativo da intensidade do dano i (TABELA 4);

K_{3i} = fator relativo à propagação do dano i em outros elementos do mesmo tipo (TABELA 5);

K_{4i} = fator que enfatiza a urgência da intervenção para o dano i (TABELA 6).

TABELA 2 – VALORES DE B

Tipo de dano (manifestação patológica)	B
Fissura mapeada	1,0
Fissura estrutural	3,0
Mancha de umidade	1,0
Eflorescência (mancha esbranquiçada)	1,0
Mancha de fogo	1,0
Fragmentação por fogo	2,0
Estalactites devido à lixiviação	1,0
Desgaste superficial do concreto	1,0
Deslocamento do concreto devido à altas tensões de compressão	4,0
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,0
Corrosão da armadura com deslocamento de concreto	3,0
Corrosão da armadura com deslocamento e perda de seção	4,0
Corrosão da armadura com deslocamento e rompimento da barra	5,0
Forma aderida à superfície do concreto	1,0
Armadura exposta por deficiência de cobrimento, sem corrosão	2,0
Concreto segregado	2,0
Nicho de concretagem	2,0
Desalinhamento de elemento	2,0
Deslocamento de elemento	2,0
Falta de prumo de elemento	2,0
Recalque diferencial	4,0
Deformação excessiva	5,0
Descalçamento de fundação	2,0
Exposição das estacas de fundação	3,0
Percolação de águas pluviais ou subterrâneas em encontro	2,0
Deslizamento em encontro não gerando esforços imprevistos	2,0
Deslizamento em encontro gerando esforços imprevistos	3,0
Recalque do aterro de aproximação	3,0
Dano no aparelho de apoio não gerando esforço imprevisto	2,0
Dano no aparelho de apoio gerando esforço imprevisto	4,0
Obstrução de junta não causando restrição à movimentação	1,0
Obstrução de junta causando restrição à movimentação	2,0
Abertura excessiva de junta	2,0
Recapeamento irregular de junta	2,0
Desnível entre tabuleiros	3,0
Inexistência de drenos	2,0
Entupimento de drenos	2,0
Quantidade ou tamanho insuficiente de drenos	2,0
Deficiência nas pingadeiras e buzinos	2,0
Desgaste do pavimento	1,0
Afundamento, escorregamento e/ou ondulação no pavimento	2,0
Buraco no pavimento	3,0
Iluminação deficiente	1,0
Estética causando insegurança ao usuário	1,0
Trânsito de cargas elevadas	1,0
Sinalização deficiente	2,0
Nível de vibração elevado	2,0
Guarda-corpo rompido ou inexistente	2,0
Impossibilidade de acesso ao passeio	2,0
Ausência de passeio em área urbana	2,0
Ausência de acostamento	2,0
Barreira não padronizada	2,0
Choque de veículos	3,0
Vegetação incrustada	1,0
Corrosão em elementos metálicos	3,0
Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	4,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

TABELA 3 - VALORES DE K1

K 1	Elemento
0,10	Barreira; defesa metálica; guarda-rodas; guarda-corpo. Sinalização.
0,20	Transversina de ligação. Encontro. Aterro de acesso; laje de aproximação. Junta de dilatação. Pavimento; calçada. Operação. Drenagem.
0,30	Transversina portante. Muro de terra armada. Camisa metálica de revestimento para estaca.
0,40	Laje; viga de enrijecimento de laje. Travessa. Pilar; contraventamento de pilar. Aparelho de apoio; articulação metálica. Muro de arrimo de concreto; talude revestido em concreto. Estaca; bloco; sapata; tubulão; estacão. Reforço de laje, pilar ou estaca. Estais e respectivas ancoragens.
0,50	Treliça
0,60	Viga; reforço de viga. Dente gerber. Ponte em laje. Torre para estaiamento. Arco.

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

TABELA 4 – VALORES DE K2

Grau	Porcentagem da área superficial total do elemento afetada	K₂
Insignificante	Menos de 3%	0,00
Pequeno	De 3% a 10%	0,50
Médio	De 10% a 25%	1,00
Grande	De 25% a 75%	1,50
Imenso	Mais de 75%	2,00

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

TABELA 5 – VALORES DE K3

Porcentagem de elementos do mesmo tipo que apresentam o dano	K₃
Menos de 10%	0,50
De 10% a 25%	1,00
De 25% a 75%	1,50
Mais de 75%	2,00

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

TABELA 6 – VALORES DE K4

Classificação	Critério	K 4
Não urgente	Dano não interfere na utilização e capacidade da OAE, e também não altera a sua durabilidade	1,00
Dano a reparar	Dano deve ser reparado em até 5 anos, para garantir a servicibilidade e não comprometer a durabilidade da OAE	2,50
Reparo imediato	Dano está comprometendo a utilização da OAE, oferecendo risco aos usuários	4,00
Limitação de carga	Dano gravíssimo sendo necessário limitar a carga, interromper o tráfego ou escorar a OAE até que o reparo seja realizado	5,00

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

Para que se possa comparar as condições de diferentes OAEs é necessário calcular o Índice de Performance Relativo (IP_{REL}) de cada ponte, conforme Equação 5:

$$IP_{REL} = \frac{\sum IP_{ABS}}{\sum IP_{REF}} \quad (5)$$

onde:

IP_{REL} = índice de performance relativo;

IP_{ABS} = índice de performance absoluto;

IP_{REF} = índice de performance de referência.

O índice de performance de referência para uma OAE busca representar a pior condição de conservação que esta pode apresentar, e assim é obtido considerando a ocorrência de todos os danos possíveis, para todos os elementos a compõem, utilizando os valores máximos de intensidade e extensão do dano ($K_2 = 2,00$; $K_3 = 2,00$) e o valor mínimo para a urgência de intervenção ($K_4 = 1,00$):

Cabe observar que o modelo apresenta um viés de subjetividade, assim como os demais modelos apresentados, visto que a avaliação da OAE é função da inspeção visual e fica sob a responsabilidade do inspetor, e isto torna fundamental que estes profissionais tenham qualificação adequada para exercer tal atividade, a fim de que os resultados de suas análises minimizem possíveis dúvidas e incertezas.

Este modelo atualmente encontra-se na fase de calibração dos parâmetros utilizados, e para tal já foi aplicado em mais de quinhentas OAEs situadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.

2.4 TEORIA DA VULNERABILIDADE ESTRUTURAL

Os métodos de análise estrutural atuais permitem que as estruturas resistam às cargas de projeto pré-determinadas ou atendam a um nível de segurança estipulado. Entretanto, as falhas estruturais podem ocorrer por diferentes motivos, que não só o não atendimento ao uso previamente projetado, como a ocorrência de cargas acidentais, erros humanos, degradação não detectada de componentes, eventos naturais, entre outros. Esses eventos atípicos são “muito difíceis, se não impossíveis de prever, e não fazem parte da maioria das normas atuais de projeto ou dos métodos de projeto” (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003, p. 263). Assim, contemplar essas ações acidentais na elaboração de projetos, se torna um grande desafio para o projetista.

Outra dificuldade na consideração em projeto da ocorrência de ações excepcionais está na relação de proporcionalidade entre dano e consequência. Segundo Agarwal, Blockley e Woodman (2003, p. 263) “há muitos exemplos de falhas, onde um dano relativamente pequeno tem causado grandes consequências estruturais”, o que demonstra que a relação entre a dimensão do dano e a dimensão das consequências, não é, necessariamente, diretamente proporcional, e ainda que existem partes da estrutura que possuem maior importância para a estabilidade do conjunto.

Nesse contexto foi desenvolvida a Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002) visando trazer uma análise inovadora no campo da segurança estrutural, de forma relativamente simples, porém eficiente. A Teoria tem como objetivo a identificação dos membros mais vulneráveis de uma estrutura, e apresenta cenários de falha onde pequenos danos têm consequências estruturais relativamente grandes.

Agarwal, Blockley e Woodman (2003, p. 264) afirmam que o termo vulnerabilidade “é frequentemente usado para transmitir a susceptibilidade de um componente ou de um sistema à alguma ação externa”. Assim, qualquer sistema que possua elementos sujeitos à ocorrência de evento que possa danificá-los apresenta um determinado nível de vulnerabilidade. Para a Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, como elucidado por Pinto, Blockley e Woodman (2002), uma estrutura, ou parte desta, é considerada vulnerável se um dano relativamente pequeno puder causar consequências desproporcionalmente grandes. Por exemplo,

se a remoção de um único elemento estrutural, como uma viga, provocar o colapso imediato de um edifício por completo, entende-se que essa estrutura é bastante vulnerável.

A Teoria da Vulnerabilidade Estrutural é baseada exclusivamente na forma da estrutura, analisando de que modo os elementos estruturais são conectados uns aos outros, e estabelecendo, assim, um modelo hierárquico da estrutura onde são investigados cenários de falha. De forma geral, os três procedimentos para aplicação da Teoria, conforme descrito por Agarwal, Blockley e Woodman (2003), são:

- a) identificação de anéis (*rings*) e esferas (*rounds*) estruturais;
- b) criação de uma descrição hierárquica da estrutura através do processo de agrupamento e;
- c) pesquisa através da hierarquia estrutural para visualizar cenários vulneráveis.

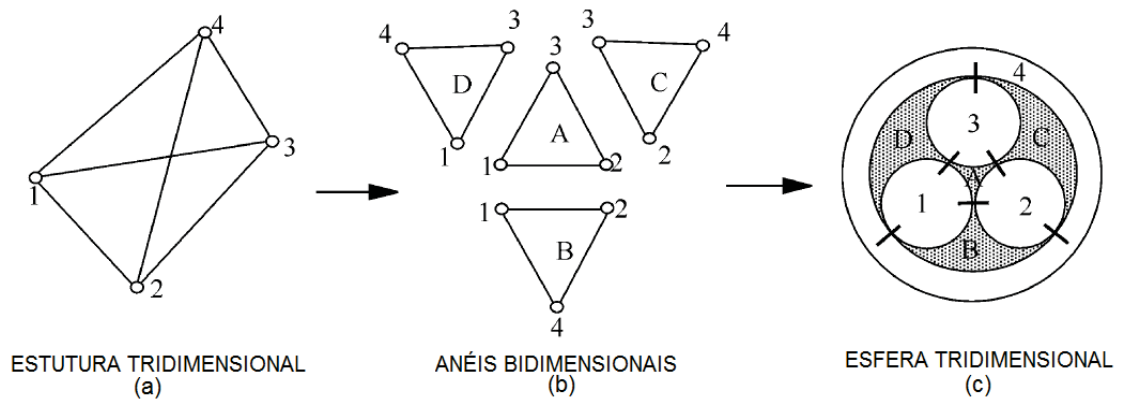
2.4.1 Anéis e esferas estruturais

Um anel estrutural é formado por elementos que compõem a estrutura e possuem uma ligação comum entre si, como um nó ou articulação que une esses membros. Esse grupo de elementos configura um caminho a ser percorrido por cargas que venham a ser aplicadas, e é capaz de resistir a um conjunto arbitrado de forças (ENGLAND; AGARWAL; BLOCKLEY, 2008). Uma esfera estrutural consiste na junção de anéis estruturais configurando um caminho de carga em três dimensões. Essas definições são exemplificadas na FIGURA 4, onde uma estrutura tetraédrica é decomposta em 4 anéis bidimensionais, e representada como uma esfera tridimensional.

Cabe observar que os termos “anéis” e “esferas” fazem alusão à estruturas em duas e três dimensões respectivamente, e não especificamente à formas circulares ou esféricas.

Além dos grupos (anéis e esferas) formados pelos elementos que integram a estrutura, existe um grupo base, chamado “grupo de referência”. Esse grupo é o que sustenta todo o desenvolvimento da estrutura, sendo normalmente composto pelo solo em que a estrutura está apoiada (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DE ANÉIS E ESFERAS ESTRUTURAIS



FONTE: Adaptado de AGARWAL, BLOCKLEY E WOODMAN (2003).

2.4.2 Processo de agrupamento

Após a identificação de possíveis anéis e esferas estruturais, inicia-se o processo de agrupamento desses conjuntos, de modo que ao final do processo toda a estrutura constitua um único grande grupo, e então possa ser gerada uma descrição hierárquica da mesma. O agrupamento inicia pelo grupo que possuir os membros com a conexão mais forte entre si, na sequência vão sendo adicionados novos membros priorizando os que possuam melhor conexão com os já presentes no aglomerado, até que todos sejam agrupados e constituam o diagrama do “modelo hierárquico da estrutura” (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

A conexão entre os elementos é avaliada através do conceito de “qualidade de formação” (*wellformedness*), que é representado pela letra “Q”, e é uma medida da qualidade da conexão dos elementos estruturais, baseada nos graus de liberdade dos nós oriundos das ligações entre esses elementos (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003). Este parâmetro busca avaliar o desempenho do segmento da estrutura formado, levando em consideração a interação dos membros e o resultado do seu trabalhando em conjunto.

A qualidade de formação de uma esfera estrutural é dada por:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N} \quad (6)$$

onde:

Q = qualidade de formação;

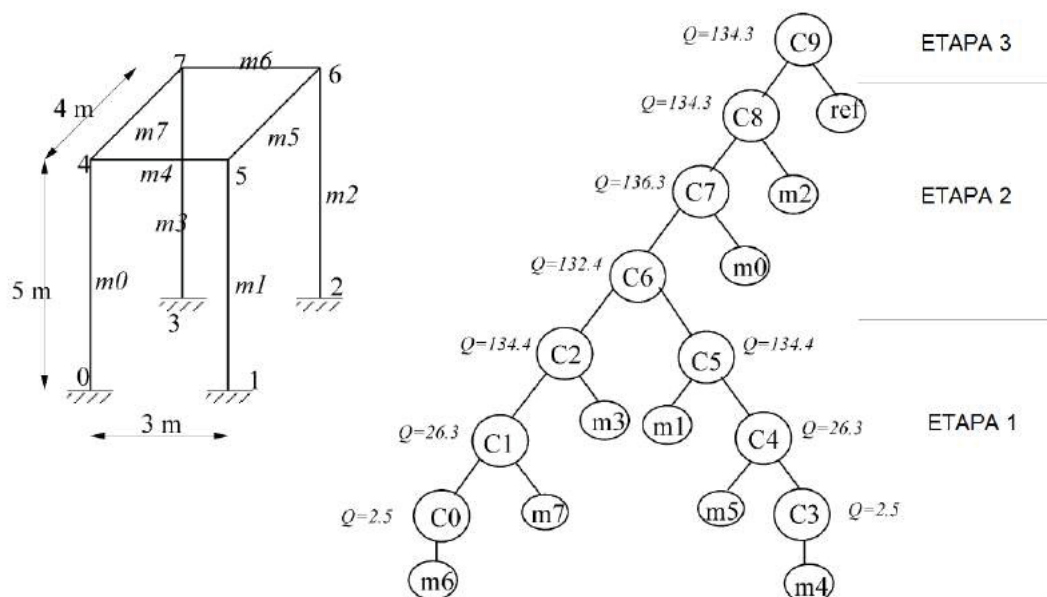
q_i = qualidade formação individual da cada conexão entre elementos estruturais (nós) presente na esfera, dado pelo determinante da submatriz de rigidez K_{ii} associado a qualquer articulação i na esfera;

N = número total de nós existentes na esfera.

Se a análise segundo o parâmetro Q não resultar em uma escolha única, ou seja, mais de um elemento se adicionado ao grupo resulta na mesma qualidade de formação, sendo esta a máxima qualidade de formação possível perante os elementos disponíveis, então outras análises devem ser feitas. Pinto, Blockley e Woodman (2002) sugerem reflexões acerca da demanda mínima de dano, da conectividade nodal, e da distância do grupo de referência. Quando ainda assim nenhum dos critérios resultarem em uma escolha única, um membro deve ser escolhido arbitrariamente.

Para melhor entendimento do processo de agrupamento será apresentado o exemplo da FIGURA 5. A estrutura hipotética de estudo é formada por oito membros, quatro destes conectados à base (solo) através dos pontos 0, 1, 2 e 3, com mais quatro pontos de conexão interna da estrutura (nós): 4, 5, 6, 7.

FIGURA 5 - EXEMPLO ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL (À ESQUERDA) E SEU MODELO HIERÁRQUICO (À DIREITA)



FONTE: Adaptado de AGARWAL, BLOCKLEY E WOODMAN (2003).

O esquema hierárquico é composto por dez grupos (clusters) denominados C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9. É possível observar os membros que são adicionados a cada grupo, em cada etapa, e a qualidade de formação “Q” resultante desses agrupamentos.

O processo de agrupamento inicia com o grupo zero (G0), composto por apenas um elemento estrutural, o membro 6. Na próxima etapa de agrupamento existem quatro candidatos a ingressar ao grupo: os membros dois, três, cinco e sete, e devido a melhor conexão com os elementos já existentes no grupo o membro sete é adicionado (G1). Em sequência o único membro que pode ser acrescentado ao grupo é o membro três (G2), pois é o único que possui uma ligação estrutural (nó) simultânea com os membros seis e sete.

Após a inclusão do membro 3 observa-se que não existe nenhum outro elemento que tenha ligação, ao mesmo tempo, com os três membros já agrupados (m6, m7 e m3), e assim inicia-se a formação de um novo grupo (G3) composto pelo elemento 4. De forma semelhante à primeira sequência de grupos formados (G0, G1 e G2), são agrupados os membros cinco (G4) e um (G5). O grupo 5 então depara-se com o mesmo problema enfrentado pelo grupo 2: não existe nenhum outro membro que pode ser acrescentado ao grupo. Neste momento é encerrada a primeira etapa de agrupamento.

A alternativa então seria iniciar um novo grupo, porém não existe nenhum grupo que possa ser criado, pois os únicos elementos disponíveis para iniciar esse processo são os membros zero e dois, e estes enfrentam restrições devido à disposição dos elementos da estrutura. Os elementos zero e dois não possuem condições para originar uma nova sequência de grupos, porque não existem membros livres para se conectarem de forma independente a esses, dando andamento ao processo, pois os únicos elementos que possuem conexão nodal com esses já estão incluídos nos grupos dois e cinco.

O procedimento, frente à impossibilidade de criação de novos grupos, é unir os grupos já existentes, G2 e G5, que são conectados estruturalmente um ao outro através dos nós quatro e seis, dando início a segunda etapa de agrupamento. O próximo passo é acrescentar um por um os elementos ainda externos ao agrupamento: membro zero (G7) e membro dois (G8); o que é feito de forma arbitrária, pois como ambos os membros possuem o mesmo nível de conexão (Q) com o restante da estrutura, a ordem em que são acrescentados é indiferente, tendo

a mesma influência na composição da hierarquia. Por fim, o grupo de referência (ref), neste caso o solo, é agrupado (G9), e assim toda a estrutura constitui um único grande grupo.

2.4.3 Cenários de falha

Definido o modelo hierárquico da estrutura inicia-se a última etapa da análise da vulnerabilidade, que consiste na busca por cenários de falha vulneráveis. Um cenário de falha é caracterizado pela ocorrência de uma sequência de eventos de deterioração de elementos, que termina por provocar o colapso de toda a estrutura (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2001). Agarwal, Blockley e Woodman (2003, p. 265) pontuam que:

cenários de falha, onde as consequências são desproporcionalmente elevadas se comparadas ao dano, são de particular interesse porque tais cenários podem ser negligenciados em uma análise de resposta normal se estes tiverem uma probabilidade baixa [de ocorrência] (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003, p. 265).

Esse aspecto é o que diferencia a análise da vulnerabilidade das demais análises de segurança. A singularidade da Teoria se dá devido ao fato de esta apontar não os eventos de deterioração que tem maior chance de atingir a estrutura, mas sim os eventos que podem ocorrer e provocar graves consequências, independente da sua probabilidade de ocorrência.

Um evento de deterioração em um elemento estrutural consiste em uma ação que ocasione a perda de um ou mais graus de liberdade do elemento, o que pode ocorrer devido a um corte no elemento ou devido à formação de uma junta articulada (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

A busca por cenários de falha tem como objetivo identificar os cenários que provocam consequências desproporcionais, ou seja, em que um dano relativamente pequeno é capaz de afetar intensamente a estabilidade da estrutura (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003). Uma estrutura pode apresentar inúmeros cenários de falha, porém a busca restringe-se a cinco cenários em especial, que possuem importância mais significativa:

- a) Cenário de falha total: aquele em que um esforço mínimo é capaz de provocar o colapso de toda a estrutura. Um dano relativamente pequeno

atinge diretamente um ou mais elementos estruturais, que vão, consequentemente, desestabilizando os demais membros, até comprometer toda a estrutura;

- b) Cenário de falha máximo: aquele em que há a maior desproporcionalidade entre a dimensão do dano que atingiu a estrutura e as consequências estruturais decorrentes (maior índice de vulnerabilidade) (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003). Em algumas situações pode coincidir com o cenário de falha total;
- c) Cenário de falha com demanda mínima: compreende o evento de deterioração que possui maior facilidade para danificar a estrutura, independente da dimensão do dano (AGARWAL; BLOCKLEY; WOODMAN, 2003);
- d) Cenário de falha mínimo: possui o menor índice de vulnerabilidade, e assim é aquele em que o elemento danificado é o último a ser adicionado ao grupo no processo de agrupamento, não incluindo o grupo de referência;
- e) Cenários de falha interessantes: estão relacionados a características particulares da estrutura e/ou a razões locais, e assim são considerados importantes pelo projetista (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

2.4.4 Índice de vulnerabilidade

O Índice de Vulnerabilidade expressa a desproporcionalidade entre um dano que afetou um elemento estrutural e as suas consequências para o restante da estrutura (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002). Numericamente esse índice é dado pela razão entre a consequência estrutural (C) e a demanda de dano relativa do cenário de falha em análise (D_R), como expressa a Equação 7:

$$I = \frac{C}{D_R} \quad (7)$$

onde:

I = índice de vulnerabilidade;

C = consequência;

D_R = demanda de dano relativa.

A consequência que um cenário de falha tem em uma estrutura é mensurada pela razão entre o decréscimo na qualidade de formação que a estrutura teve decorrente da sua deterioração, e a qualidade de formação da estrutura intacta (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002), como demonstra a Equação 8.

$$C = \frac{Q_{\text{ESTRUTURA intacta}} - Q_{\text{ESTRUTURA deteriorada}}}{Q_{\text{ESTRUTURA intacta}}} \quad (8)$$

onde:

C = consequência;

$Q_{\text{ESTRUTURA intacta}}$ = qualidade de formação da estrutura intacta, ou seja, sem simulação do cenário de falha;

$Q_{\text{ESTRUTURA deteriorada}}$ = qualidade de formação da estrutura deteriorada, ou seja, após simulação do cenário de falha.

O esforço necessário para causar um evento de deterioração é assumido, pelos desenvolvedores da teoria, como diretamente proporcional à perda de rigidez do elemento afetado por tal evento. Essa quantificação é chamada “demanda de dano” (*damage demand*) e representa a demanda de esforço necessária para que o dano ocorra. Wu, Blockley e Woodman (1993) destacam que a medida da demanda de dano não precisa quantificar diretamente o trabalho real que é feito para provocar um evento de deterioração, pois essa será usada apenas como uma medida relativa para comparar os cenários de falha em uma determinada estrutura. Assim, em um cenário de falha a demanda de dano é dada pela soma da demanda de dano de cada evento de deterioração que compõe esse cenário (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002), ou seja, a demanda de dano não é relativa a um único dano e sim ao conjunto de danos que caracteriza o cenário

A demanda de dano máxima é obtida através da consideração de um evento de deterioração onde todos os elementos da estrutura fossem deteriorados. A razão entre a demanda de dano de um cenário de falha e a demanda de dano máxima possível para a estrutura é tida como “demanda de dano relativa”, conforme demonstra a Equação 9.

$$D_R = \frac{D}{D_{\text{máx}}} \quad (9)$$

onde:

D_R = demanda de dano relativa;

D = demanda de dano do cenário;

$D_{\text{máx}}$ = demanda de dano máxima possível para a OAE.

Deste modo, é possível avaliar a vulnerabilidade de uma estrutura, não enfrentando as limitações dos métodos convencionais de análise, uma vez que o método apresentado está concentrado apenas na identificação de eventos de deterioração que compõem um cenário de falha, não importando sua probabilidade de ocorrência. Ainda, a aplicação da teoria implica no uso de dados decorrentes de características próprias da estrutura, como a rigidez dos elementos estruturais, resultando em um único e invariável dado de entrada, ao contrário do que ocorre quando são feitas considerações de cargas, que resultam em muitas possibilidades de entrada no sistema.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as características desta pesquisa e a metodologia adotada para seu desenvolvimento.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA

Segundo Akgul (2013) as pesquisas acerca do gerenciamento de OAEs costumam ser de dois tipos: pesquisas teóricas e estudos que produzem modelos fundamentais; ou estudos envolvendo aplicações práticas de métodos desenvolvidos. Esta pesquisa se enquadra na primeira categoria citada pelo autor, uma vez que pretende propor um modelo de análise da operacionalidade de OAEs, que é fundamentado através de pesquisa bibliográfica relacionada ao tema.

De acordo com Gil (2009, p. 41) a pesquisa realizada para tal desenvolvimento foi de cunho exploratório, pois buscou “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses”. Assim o propósito do estudo foi aprimorar ideias e descobrir intuições, envolvendo o levantamento bibliográfico e a análise de exemplos que estimulem a compreensão do trabalho apresentado (SELLTIZ; WRIGHTSMAN; COOK, 1967 apud GIL, 2009).

A pesquisa bibliográfica, principal método utilizado para cumprir os objetivos do trabalho, é um procedimento técnico caracterizado por ser desenvolvido com base em material já elaborado, composto principalmente por livros e artigos científicos (GIL, 2009). Cabe observar que este tipo de pesquisa “não é apenas uma repetição do que já foi falado ou escrito sobre determinado assunto, mas sim, uma forma de examinar o tema sobre um novo enfoque, podendo chegar a conclusões inovadoras” (LAKATOS, 1991, p.66), exatamente o que se pretende com este trabalho: propor uma nova abordagem de interpretação das informações referentes à OAEs.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

A fim de apresentar com clareza a estratégia definida para elaborar este estudo, bem como a proposta e a finalidade do conteúdo exposto, é descrito neste item a metodologia de desenvolvimento da pesquisa.

Todavia, antes de precisar a metodologia que guiou a construção deste trabalho, cabe mencionar o caminho que conduziu à identificação de tal demanda de estudo, e que agregou conhecimento proveniente de vivência prática desta temática, que é aqui apresentado e funde-se com os resultados da pesquisa bibliográfica. A presente autora participa desde meados de 2014, através do Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA) da Universidade Federal do Paraná, de um termo de cooperação estabelecido entre UFPR e DNIT intitulado “Desenvolvimento e aplicação de metodologia de avaliação objetiva das condições funcionais e estruturais de obras de arte especiais”, e que é coordenado pelo coorientador deste trabalho. Entre as atividades previstas no termo citado, tem-se a inspeção de todas as pontes e viadutos sob responsabilidade do governo federal, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina, totalizando 182 e 356 obras em cada unidade federativa, respectivamente. Destacam-se ainda, entre as atividades do termo, a elaboração de um curso de educação a distância de capacitação de profissionais para inspeção de OAEs, e o desenvolvimento de uma ferramenta de gestão de OAEs. A presente autora participou, direta ou indiretamente, da inspeção das obras supracitadas, e atualmente está envolvida no desenvolvimento das outras atividades do termo de cooperação.

Um estudo inicial sobre a avaliação da vulnerabilidade da operacionalidade de OAEs foi desenvolvido em 2016 pela autora, sob orientação do coorientador desta dissertação, constituindo o trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de Engenheira Civil pela UFPR. Visando dar prosseguimento em tal estudo, a pesquisa foi continuada e seu estado atual é apresentado nesta dissertação.

Isto posto, pode-se dar início à descrição da metodologia do trabalho desenvolvido nesta pesquisa, que foi estruturada conforme apresentado na FIGURA 6.

A etapa 1 de desenvolvimento do trabalho, apresentada na seção 2 do presente trabalho e dedicada ao embasamento teórico deste estudo, iniciou pela revisão dos aspectos teóricos relacionados à inspeção de OAEs (item 1.1 da

FIGURA 6), contemplando os elementos e sistemas que compõem estas obras, e os mecanismos de degradação e manifestações patológicas (danos) passíveis de ocorrência neste tipo de estrutura. Na sequência, a pesquisa bibliográfica foi dedicada à temática da gestão de obras de arte especiais (item 1.2 da FIGURA 6), dando maior ênfase aos sistemas desenvolvidos para tal, assunto difundido na literatura estrangeira como *bridge management system (BMS)*. Para orientar a execução deste item de pesquisa em especial, optou-se por utilizar alguns procedimentos comuns aos métodos de revisão sistemática da literatura.

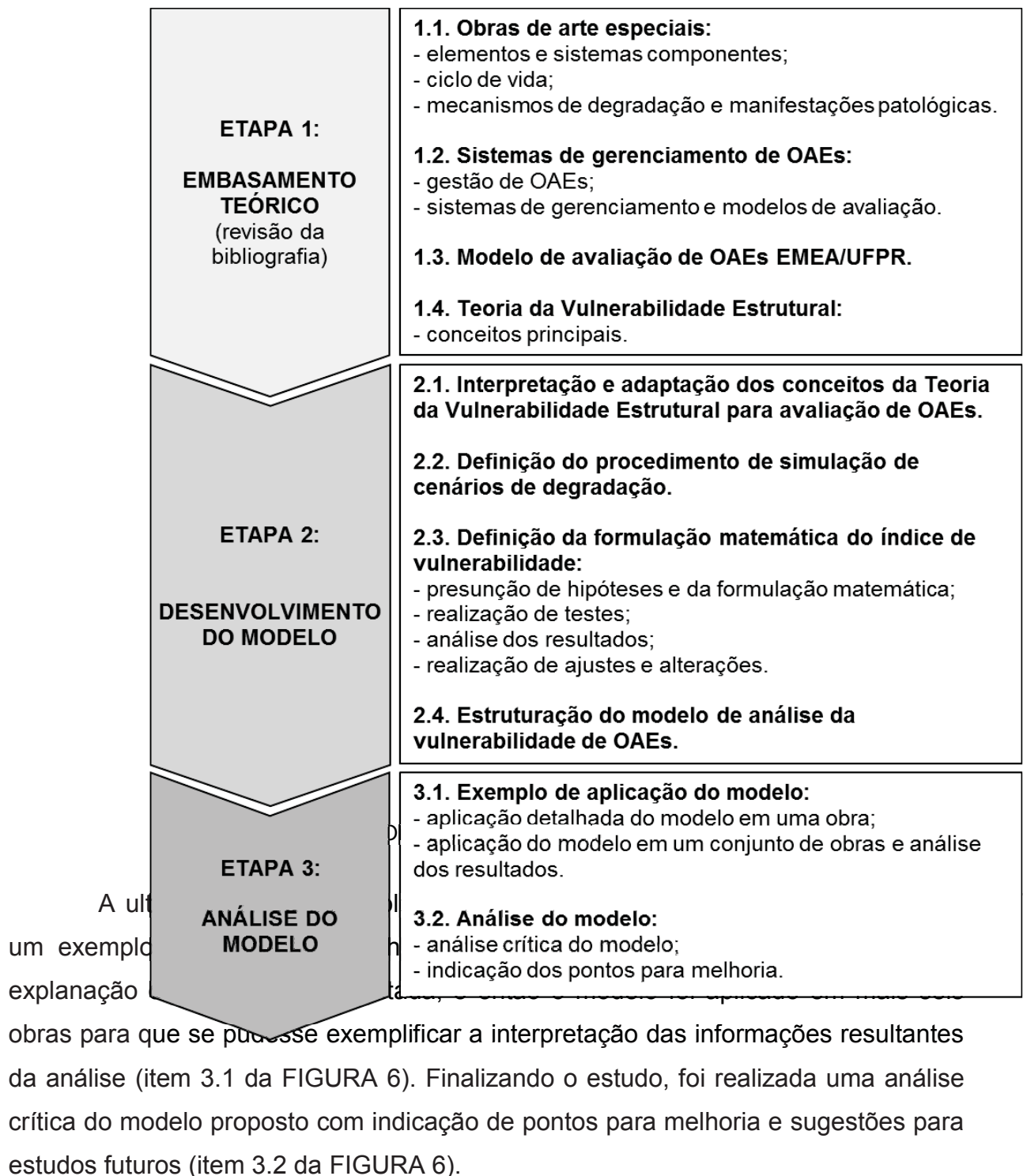
Entre os modelos de avaliação de OAEs estudados, os quais são parte fundamental de um sistema de gestão deste tipo de obra, destaca-se a apresentação do modelo desenvolvido pelo EMEA/UFPR (item 1.3 da FIGURA 6), que não é resultado do procedimento de revisão sistematizada, mas foi apresentado por fornecer subsídios importantes para a presente proposta de modelo de análise de OAEs.

Finalizando a etapa 1, a última fase da pesquisa teórica foi dedicada à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (TVE) (item 1.4 da FIGURA 6), que foi apresentada porque o modo como analisa a vulnerabilidade das estruturas mostrou-se interessante e com potencial para ser adaptado para a realização de outras análises. Deste modo, buscou-se estabelecer uma analogia a esta teoria para análise da vulnerabilidade de OAEs, empregando os seus principais conceitos.

Acumulada a carga teórica supracitada foi iniciado o desenvolvimento da etapa 2, destinada ao desenvolvimento da proposta de modelo apresentada, que pode ser dividida em quatro fases principais. Primeiro foram interpretados os principais conceitos da TVE e definidos os aspectos que permitiriam a construção de uma analogia, e então estes conceitos foram adaptados para a realidade de inspeção e avaliação de OAEs. Na sequência definiu-se o método de simulação de cenários de degradação em OAEs, visto que estes são essenciais para a análise da vulnerabilidade.

Na terceira fase da etapa 2, que é dedicada à formulação matemática do índice de vulnerabilidade para OAEs, foi realizado um processo cíclico e iterativo de presunção de hipóteses e equações, aplicações em testes, análise dos resultados obtidos, e realização de ajustes e alterações necessários, até se chegar a um modelo satisfatório (item 2.3 da FIGURA 6). Por fim, foi estruturado o modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs.

FIGURA 6 – METODOLOGIA DE PESQUISA



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção é apresentado o resultado do presente trabalho, que consiste na proposição de um modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs, composto, basicamente, pela simulação de cenários de falha e cálculo dos respectivos índices de vulnerabilidade. Os produtos apresentados resultam da revisão bibliográfica realizada, da familiaridade da autora e dos orientadores com a temática estudada, e de um processo iterativo de interpretação de conceitos, presunção de hipóteses, e realização de testes em planilha eletrônica.

Primeiramente, é apresentado o desenvolvimento da formulação matemática do índice de vulnerabilidade de OAEs, seguido pela explicação do procedimento de simulação de cenários de falha, e finalmente são realizados dois exemplos que auxiliam na compreensão do modelo proposto.

4.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE OAES

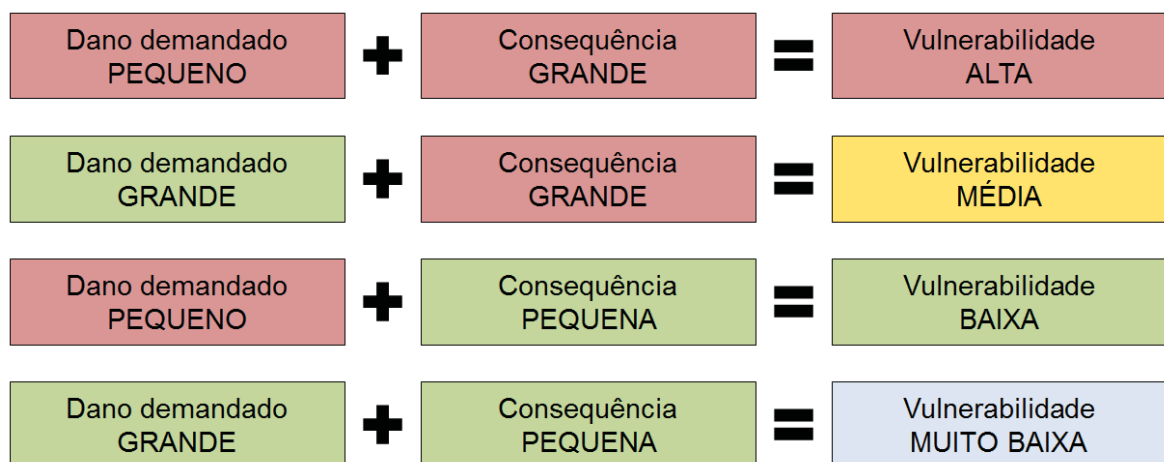
Conforme descrito na seção de metodologia deste trabalho, a abordagem do conceito de vulnerabilidade usada no desenvolvimento do índice proposto neste estudo é inspirada na abordagem apresentada na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (etapa 2.1 da metodologia apresentada na FIGURA 6). Na referida teoria a estrutura é representada pelas conexões tridimensionais que os elementos possuem entre si, caracterizando os tipos de articulação existentes e os graus de liberdade de cada elemento. No índice de vulnerabilidade para OAEs objetivou-se caracterizar a estrutura não segundo a sua configuração estrutural, mas sim segundo o seu estado de conservação, através do tipo e magnitude dos danos que esta apresenta, sejam estes de cunho estrutural, ou de durabilidade dos materiais que a constituem, tendo como base para coleta destes dados o modelo de avaliação de OAEs EMEA/UFPR.

Outro aspecto importante da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, utilizado no modelo proposto, é o fato de que a avaliação da vulnerabilidade de uma estrutura é sempre relativa a um cenário futuro hipotético de deterioração da obra. Deste modo, para analisar a vulnerabilidade de uma OAE é necessário simular ao menos um cenário futuro de degradação desta, e então o índice de vulnerabilidade, através de uma comparação entre as condições de conservação da obra no momento da inspeção e as suas condições no cenário simulado, quantificará e correlacionará

matematicamente a relação entre a consequência que o cenário provocou na obra, e o esforço necessário para causá-lo. Apesar da simulação de cenário de deterioração anteceder o cálculo do índice, julgou-se mais didático apresentar primeiro este, e depois a simulação.

Cabe reforçar que a análise de vulnerabilidade não indica a maior ou menor facilidade, ou, ainda, a probabilidade, da ocorrência de um dado cenário futuro de degradação. O índice de vulnerabilidade é um parâmetro que tem como propósito correlacionar a facilidade de ocorrência de um determinado evento de deterioração, ou seja, a quantidade de dano demandado para concretizar o cenário e as consequências que este teve para a estrutura. Assim, partindo destes dois principais critérios que resultam no índice de vulnerabilidade, a facilidade de ocorrência e a consequência, neste estudo entende-se que conceitualmente existem os seguintes resultados possíveis para as combinações de suas ocorrências em diferentes níveis de intensidade (FIGURA 7):

FIGURA 7 – COMBINAÇÕES ENTRE DANO DEMANDADO E CONSEQUÊNCIA



FONTE: A autora (2018).

A FIGURA 7 permite inferir, através das combinações que resultam em uma vulnerabilidade média e baixa, que conceitualmente o parâmetro de consequência, se comparado à facilidade de ocorrência, é mais significativo para a gravidade da vulnerabilidade. Isso ocorre porque independentemente da quantidade de dano que foi necessária para configurar um dado cenário de deterioração, o que importa

primeiramente, em termos práticos, é a influência negativa que este cenário teve na estrutura e consequentemente nos usuários.

Visando atender o objetivo geral deste trabalho, que consiste em propor um modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs que possa ser realizada com o uso de dados coletados em campo, durante procedimentos de inspeção rotineira, optou-se por adotar neste estudo o modelo de avaliação de OAEs desenvolvido na UFPR pelo EMEA, como base para análise e cálculo do índice de vulnerabilidade. Todavia cabe destacar que outros modelos de avaliação de OAEs podem ser adaptados e utilizados para aplicação da análise da vulnerabilidade. O modelo EMEA/UFPR destaca-se entre os demais modelos apresentados na revisão bibliográfica, principalmente pelo bom nível de detalhamento através do qual as manifestações patológicas existentes em uma obra são registradas, e ainda por ser adequado à realidade brasileira no que diz respeito aos tipos de obras existentes e danos recorrentes.

O modelo EMEA/UFPR é empregado na análise da vulnerabilidade de OAEs para caracterizar o estado de conservação tanto dos elementos individualmente, quanto da obra como um todo, através do cálculo dos respectivos índices de performance. Ao longo da execução da análise da vulnerabilidade são feitas diferentes aplicações do cálculo do índice de performance: ora retrata elementos de forma individual, ora retrata a obra na sua totalidade; ora considera a ocorrência apenas de manifestações específicas, ora considera a ocorrência de todas; ora é calculado considerando parâmetros K_2 , K_3 , e K_4 reais, ora hipotéticos. Cabe ainda destacar que é através do modelo EMEA/UFPR e de seu índice de performance que é possível simular cenários de deterioração da obra. Todavia, feita esta explicação inicial que é necessária para compreensão do que é objeto principal desta seção, esses aspectos supracitados serão abordados com o devido detalhamento na seção 4.2, que trata da criação e simulação de cenários de deterioração.

Como indicado na seção de metodologia (etapa 2.3), para desenvolvimento da formulação matemática para cálculo do índice de vulnerabilidade de OAEs tomou-se como base a Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, de onde os principais conceitos foram retirados e adaptados para a aplicação pretendida. Foram testadas diversas hipóteses de representação dos conceitos através de equações numéricas, e no prosseguimento desta seção é apresentada a hipótese que atingiu o objetivo requerido de modo mais satisfatório. Cabe destacar que algumas equações que

integram o modelo de análise proposto no presente trabalho são assumidas iguais às equações constantes na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002), e outras foram desenvolvidas pela Autora (2018).

Para desenvolvimento do índice de vulnerabilidade de OAEs, a primeira consideração feita foi a de que a análise da vulnerabilidade parte da comparação entre a consequência que um cenário de deterioração simulado teve para a estrutura, e o esforço necessário para a ocorrência deste cenário em relação ao máximo esforço que poderia ser feito, aspecto este chamado de demanda de dano relativa. Assim a equação matemática para cálculo do índice de vulnerabilidade, que integra o modelo proposto neste estudo, foi assumida igual à equação apresentada na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (Equação 7):

$$IV = \frac{C}{D_R} \quad (10)$$

onde:

IV = índice de vulnerabilidade da OAE perante o cenário de deterioração simulado;

C = consequência do cenário simulado para a OAE; e,

D_R = demanda de dano relativa do cenário simulado (esforço necessário para causá-lo dadas as condições de conservação da OAE).

O conceito abordado na sequência foi o da consequência do cenário. A lógica de pensamento adotada para definição da formulação do cálculo da consequência foi a de que este parâmetro deveria refletir o quanto o cenário aproximou a obra do seu grau crítico de conservação (um cenário de degradação tão intenso que impossibilita a operação da OAE). Deste modo a consequência foi inicialmente definida como (Equação 11):

$$C = \frac{IP_{OAE \text{ cenário total}}}{IP_{OAE \text{ crítico}}} \quad (11)$$

onde:

C = consequência do cenário simulado;

$IP_{OAE \text{ cenário total}}$ = índice de performance que a ponte apresentava no momento da inspeção acrescido do índice de performance configurado no cenário de deterioração simulado; e,

$IP_{OAE \text{ crítico}}$ = índice de performance máximo que OAE pode ter (pior grau de conservação possível).

O $IP_{OAE \text{ crítico}}$ é obtido através da construção de um cenário onde ocorrem todas as manifestações patológicas possíveis para cada um dos elementos que constituem a obra, com grau de intensidade média, dado pela adoção dos valores de $K_2 = 2,00$ (imenso), $K_3 = 2,0$ (dano em mais de 75% dos elementos), e $K_4 = 2,5$ (dano a reparar). Optou-se por adotar um valor intermediário de K_4 , e não o valor máximo possível para este parâmetro que seria 5,0 (limitação de carga), por se considerar que a ocorrência simultânea de todos os danos com dimensão “imensa” já configura um cenário bastante impactante para a obra, que impediria sua operação, e que ocorreria muito antes de a ponte atingir o patamar extremo de degradação dado pela “limitação de carga”.

Assim, a formulação matemática inicialmente desenvolvida para cálculo da consequência implica que quanto mais próximo da falha total o cenário deixou a obra, maior numericamente, e deste modo pior, foi a consequência resultante. É importante observar, ainda, que a consequência do cenário considera as alterações de índice de performance para a ponte de forma global, sendo uma comparação absoluta entre os índices de performance do “cenário total” e “crítico”, não considerando particularidades do cenário de falha, como os elementos afetados e/ou tipos de dano presentes.

Entretanto, durante a aplicação do cálculo da consequência em testes, verificou-se ser necessário conferir maior sensibilidade ao cálculo em relação ao estado de conservação da obra no momento da inspeção. Segundo a abordagem dada pela autora deste trabalho, entende-se que para um mesmo cenário de falha ocorrendo em pontes com mesma morfologia, quanto melhor for o estado de conservação inicial da obra (menor IP resultante da inspeção), pior deve ser considerada a consequência do cenário.

Para auxiliar na compreensão da lógica de pensamento que conduziu a essa suposição, pode-se fazer uma analogia à existência hipotética de um muro cuja superfície está pintada de branco. Considere-se que esse muro possui uma superfície de 100 m², e que inicialmente está com sua superfície completamente

limpa. Caso seja realizada nesse muro uma pichação que ocupe aproximadamente 3 m² de área, tem-se que o impacto visual deste ato de degradação será grande, visto que antes não existia qualquer pintura no muro, e conferindo, assim, uma consequência alta e negativa para o usuário. Supondo agora que o mesmo muro já estivesse bastante pichado, restando apenas uma área branca de aproximadamente 10 m², e fosse realizada nesta área a mesma pichação de 3 m², acredita-se que esta nova pintura quase não seria percebida pelos usuários, uma vez que o muro já está bastante poluído visualmente, sendo apenas mais uma pichação entre tantas outras e tendo uma baixa consequência para o usuário.

Portanto, para diferenciar a consequência de um cenário para obras com bom estado de conservação da consequência para obras em mau estado, satisfaz-se essa demanda através do acréscimo na Equação 11, por multiplicação, do seguinte termo (Equação 12):

$$IP_{OAE \text{ crítico}} - IP_{OAE \text{ inspeção}} \quad (12)$$

onde:

$IP_{OAE \text{ crítico}}$ = pior índice de performance que OAE pode assumir; e,

$IP_{OAE \text{ inspeção}}$ = índice de performance decorrente da inspeção.

Deste modo a equação para cálculo da consequência de um cenário em uma OAE, desenvolvida pela Autora (2018) no presente trabalho, é dado pela Equação 13, ou, realizando-se a multiplicação distributiva, pela Equação 14:

$$C = \frac{IP_{OAE \text{ cenário total}}}{IP_{OAE \text{ crítico}}} \times (IP_{OAE \text{ crítico}} - IP_{OAE \text{ inspeção}}) \quad (13)$$

$$C = IP_{OAE \text{ cenário total}} - \frac{IP_{OAE \text{ cenário total}} \times IP_{OAE \text{ inspeção}}}{IP_{OAE \text{ crítico}}} \quad (14)$$

onde:

C = consequência do cenário simulado;

$IP_{OAE \text{ cenário total}}$ = dado pela soma entre o $IP_{OAE \text{ inspeção}}$ e o $IP_{OAE \text{ cenário}}$;

$IP_{OAE \text{ crítico}}$ = pior índice de performance que OAE pode assumir; e,

$IP_{OAE \text{ inspeção}}$ = índice de performance decorrente da inspeção.

É possível observar que o índice de performance da OAE no momento da inspeção acaba sendo considerado duas vezes na equação de cálculo da consequência, porém entende-se que este parâmetro está desenvolvendo diferentes papéis. O emprego do $IP_{OAE \text{ inspeção}}$ no primeiro termo da equação (Equação 11), conceitualmente e numericamente é fundamental, pois aproxima a modelagem matemática do fenômeno real. Já o emprego do $IP_{OAE \text{ inspeção}}$ no segundo termo da equação (Equação 12), também é obrigatório para que se possa quantificar a distância existente entre o estado de conservação atual da obra e o limite crítico possível.

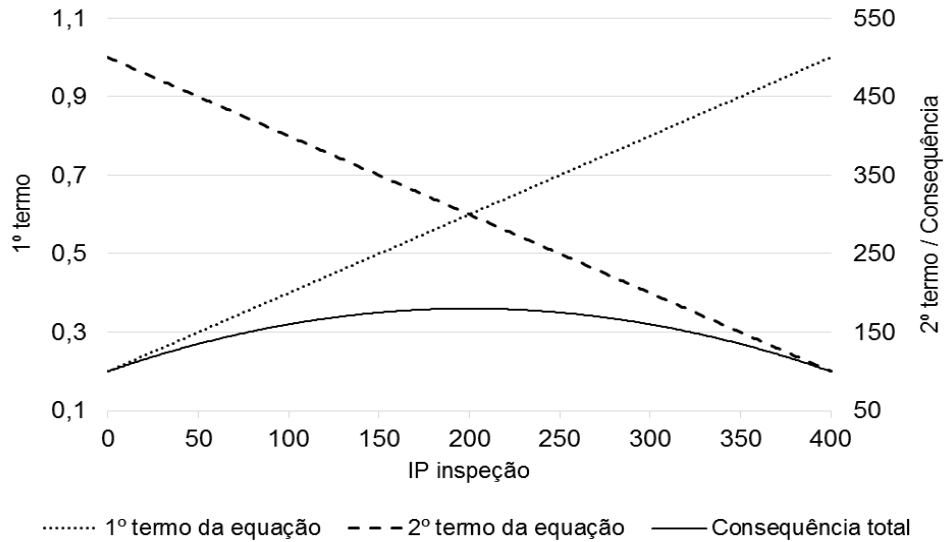
O exemplo do muro branco pode ser continuado para entender a importância conceitual da consideração do $IP_{OAE \text{ inspeção}}$ no cálculo da consequência. Considere-se um cenário de deterioração que se dá pela aplicação de uma pichação com 30 m² de área. Ao analisar a consequência do cenário para o muro, não é condizente com a realidade considerar a sua ocorrência de forma isolada, como se o restante do muro estivesse em branco, desconsiderando possíveis pichações já existentes. Uma vez que a lógica de pensamento que guia a mensuração da consequência de um cenário consiste em comparar o quanto este cenário aproximou a obra do estado crítico máximo ao qual pode chegar, é fundamental a consideração do ponto de partida do cenário, ou seja, o estado de conservação da obra quando este foi aplicado.

No GRÁFICO 3 são apresentadas as tendências de comportamento da equação da consequência e dos dois termos que a compõem em função do $IP_{OAE \text{ inspeção}}$, considerando uma obra hipotética que possui $IP_{OAE \text{ crítico}}$ igual a 500, afetada por um cenário de $IP_{\text{cenário}}$ igual a 100. A linha pontilhada apresenta o comportamento da equação de consequência caso fosse considerado apenas o seu 1º termo (Equação 11), e a linha tracejada apresenta o comportamento do 2º termo da equação (Equação 12). Por fim, a linha contínua indica o comportamento da equação com a consideração dos dois termos (Equação 13), e permite inferir que a consequência máxima ocorrerá no ponto de encontro destes dois.

Assim pode-se observar que a consequência, segundo a interpretação dada neste estudo para o referido conceito, não apresentará seu valor máximo quando a obra estiver com seu pior estado de conservação ($IP_{\text{inspeção}}$), uma vez que é resultado da interação de três fatores: o estado de conservação da obra no momento da inspeção ($IP_{OAE \text{ inspeção}}$), o estado de conservação que a ocorrência do

cenário conferiria a esta ($IP_{OAE \text{ cenário total}}$), e o grau máximo de degradação que esta poderia assumir ($IP_{OAE \text{ crítico}}$).

GRÁFICO 3 - COMPORTAMENTO DA EQUAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA E DE SEUS TERMOS



FONTE: A autora (2018).

Consolidado o cálculo da consequência, o último conceito abordado foi o de demanda relativa de dano, parâmetro que visa quantificar quanto esforço é necessário para provocar um dado cenário de falha em uma OAE. A formulação matemática adotada para cálculo deste conceito foi definida como igual à formulação apresentada na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002), onde este parâmetro é dado pela razão entre a demanda de dano específica do cenário, e a demanda de dano máxima que poderia ocorrer na estrutura (Equação 15).

$$D_R = \frac{D_{\text{CENÁRIO}}}{D_{\text{MÁXIMA}}} \quad (15)$$

onde:

D_R = demanda de dano relativa;

$D_{\text{CENÁRIO}}$ = demanda de dano requerida pelo cenário específico; e,

$D_{\text{MÁXIMA}}$ = demanda de dano máxima que poderia ocorrer na estrutura.

O cálculo da demanda de dano específica de um cenário foi formulado pela Autora (2018) como a somatória da variação no índice de performance dos elementos deteriorados no cenário simulado, considerando apenas os tipos de

danos que compõem o cenário (ignorados outros danos que o elemento porventura já apresente no momento da inspeção), conforme apresentado na Equação 16.

$$D_{\text{CENÁRIO}} = \sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}} - IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}} \quad (16)$$

onde:

n = número de elementos afetados diretamente pelo cenário;

i = elemento afetado diretamente pelo cenário;

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}}$ = índice de performance do elemento i no cenário simulado; e,

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}}$ = índice de performance do elemento i no momento da inspeção, considerando apenas a ocorrência ou não dos tipos de dano previstos no cenário simulado para este elemento.

O cálculo da demanda de dano máxima possível para uma OAE, por sua vez, foi formulado pela Autora (2018) como a somatória dos índices de performance máximos possíveis para os elementos que foram afetados diretamente pelo cenário de deterioração simulado, conforme apresentado na Equação 17. Similar ao cálculo do $IP_{\text{OAE crítico}}$ empregue no cálculo da consequência, a deterioração máxima para cada elemento é obtida considerando-se a ocorrência de todas as manifestações patológicas possíveis para o elemento, com grau de intensidade média, através do uso dos valores de $K_2 = 2,00$ (imenso), $K_3 = 2,0$ (dano em mais de 75% dos elementos), e $K_4 = 2,5$ (dano a reparar). Deste modo a diferença entre o $IP_{\text{OAE crítico}}$ e a demanda de dano máxima, é que o primeiro é dado pela consideração da ocorrência de degradação máxima em todos os elementos da ponte, e o segundo considera a degradação máxima apenas dos elementos afetados diretamente pelo cenário, de modo que, caso todos os elementos sejam afetados em um cenário, os dois valores igualem-se.

$$D_{\text{MÁXIMA}} = \sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}} \quad (17)$$

onde:

n = número de elementos afetados diretamente pelo cenário;

i = elemento afetado diretamente pelo cenário; e,

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}}$ = índice de performance máximo possível para o elemento i .

Assim, a demanda de dano relativa necessária para a ocorrência de um cenário de deterioração em uma OAE, ou seja, o esforço necessário para materializar o cenário configurado, é dado por (Equação 18):

$$D_R = \frac{D_{\text{CENÁRIO}}}{D_{\text{MÁXIMA}}} = \frac{\sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}} - IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}}}{\sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}}} \quad (18)$$

Finalmente, o índice de vulnerabilidade de uma OAE frente à ocorrência de um determinado cenário, considerando as equações desenvolvidas no presente estudo (Equações 14, 16, 17) e as relações matemáticas retiradas diretamente da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural de Pinto, Blockley e Woodman (2002) (Equações 10 e 15), é dado pela Equação 19:

$$IV = \frac{C}{D_R} = \frac{IP_{\text{OAE cenário total}} - \frac{IP_{\text{OAE cenário total}} \times IP_{\text{OAE inspeção}}}{IP_{\text{OAE crítico}}}}{\frac{\sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}} - IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}}}{\sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}}}} \quad (19)$$

onde:

IV = índice de vulnerabilidade;

C = consequência do cenário simulado;

D_R = demanda de dano relativa para ocorrência do cenário;

$IP_{\text{OAE cenário total}}$ = dado pela soma entre o $IP_{\text{OAE inspeção}}$ e o $IP_{\text{OAE cenário}}$;

$IP_{\text{OAE crítico}}$ = pior índice de performance que OAE pode assumir; e,

$IP_{\text{OAE inspeção}}$ = índice de performance decorrente da inspeção.

n = número de elementos afetados diretamente pelo cenário;

i = elemento afetado diretamente pelo cenário;

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}}$ = índice de performance do elemento i no cenário simulado;

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}}$ = índice de performance do elemento i no momento da inspeção, considerando no denominador apenas a ocorrência dos tipos de dano do cenário simulado, e no numerador considerando todos os danos existentes no elemento; e,

$IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}}$ = índice de performance máximo possível para o elemento i.

No QUADRO 1 é apresentada uma comparação entre o índice de vulnerabilidade da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural e o índice de vulnerabilidade para avaliação de OAEs proposto neste trabalho e apresentado nesta seção.

QUADRO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DA TEORIA DA VULNERABILIDADE ESTRUTURAL E O ÍNDICE PROPOSTO PARA OAES

Critério de comparação	Teoria da Vulnerabilidade Estrutural *	Análise de Vulnerabilidade de OAEs **
Tipo de obra analisada	Edificações	Obras de arte especiais
Objetivo principal da análise	Identificar elementos estruturais de grande vulnerabilidade em uma edificação, dado um cenário de falha da obra.	Identificar as OAEs de maior vulnerabilidade, dentre um grupo determinado, dado um cenário de degradação da obra.
Característica avaliada	Estabilidade estrutural da edificação, através dos graus de liberdade das articulações, e rigidez dos elementos. Os dados são sintetizados através do parâmetro <i>wellformedness</i> (Q).	Estado de conservação dos elementos estruturais, através da consideração dos danos existentes por meio do modelo EMEA/UFPR. Os dados são sintetizados através de diferentes interpretações do índice de performance (IP).
Cenário de deterioração	Um evento de deterioração consiste na perda de um ou mais graus de liberdade em um elemento estrutural.	Determina-se um evento, como por exemplo o aumento do tráfego de veículos, e configura-se o cenário selecionando os danos que esta situação provavelmente causaria na obra, através dos parâmetros do modelo EMEA/UFPR.
Simulação de cenários	São simulados todos os eventos de deterioração possíveis, através de algoritmo computacional.	São feitas diferentes interações (soma, diminuição, etc.) entre os valores configurados no cenário e os valores registrados na inspeção, através das equações determinadas.
Índice de vulnerabilidade (IV)	$IV = \frac{C}{D_R}$	$IV = \frac{C}{D_R} \quad ***$
Consequência do cenário	$C = \frac{Q_{\text{intacta}} - Q_{\text{deteriorada}}}{Q_{\text{intacta}}}$	$C = \frac{IP_{\text{OAE cenário total}}}{IP_{\text{OAE crítico}}} \times (IP_{\text{OAE crítico}} - IP_{\text{OAE inspeção}})$
Demanda de dano relativa	$D_R = \frac{D_{\text{CENÁRIO}}}{D_{\text{MÁXIMA}}}$	$D_R = \frac{D_{\text{CENÁRIO}}}{D_{\text{MÁXIMA}}} \quad ***$
Demanda de dano do cenário	Dada pela perda de rigidez que os elementos deteriorados no cenário tiveram.	$D_{\text{CENÁRIO}} = \sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ cenário}} - IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ inspeção}}$ Dada pela alteração no índice de performance apenas dos elementos deteriorados no cenário, e considerando somente os danos que caracterizam o cenário.
Demanda de dano máxima	Dada pela perda de rigidez dos elementos em um cenário no qual todos fossem deteriorados	$D_{\text{MÁXIMA}} = \sum_{i=1}^n IP_{\text{ELEMENTO } i \text{ máximo}}$ Dada pela somatório dos índices de performance máximos que os elementos afetados pelo cenários poderiam ter.

FONTE: A autora (2018).

* Modelo de análise desenvolvido por Pinto, Blockley e Woodman (2002).

** Modelo de análise desenvolvido pela Autora (2018) e proposto neste estudo.

*** Equação que integra o modelo proposto pela Autora (2018) e que foi assumida igual à equação apresentada na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural por Pinto, Blockley e Woodman (2002).

4.2 CRIAÇÃO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE DETERIORAÇÃO

Como citado anteriormente, a análise da vulnerabilidade de uma obra só é possível se nesta for simulado a ocorrência de um evento de deterioração, e então for comparado o cenário atual, que retrata a obra com as condições de conservação que apresenta em campo, com o cenário simulado, onde são acrescentados os danos desejados (etapa metodológica 2.2).

O modelo EMEA/UFPR abrange a avaliação tanto dos elementos estruturais quanto a dos elementos funcionais, como dispositivos de drenagem, de iluminação, pavimento, entre outros. Entretanto, como este estudo é direcionado apenas à avaliação dos elementos de caráter estrutural, foram feitas algumas restrições quanto aos dados que podem ser coletados do modelo EMEA/UFPR para uso na análise da vulnerabilidade de OAEs. Assim, para caracterização das OAEs podem ser utilizados os elementos apresentados na TABELA 7, com seus respectivos valores de K_1 .

TABELA 7– ELEMENTOS CONTEMPLADOS PELA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE OAES

Elemento	K_1
Laje	0,4
Travessa	0,4
Viga longitudinal	0,6
Viga transversal	0,3
Pilar	0,4
Aparelho de apoio	0,4
Encontro	0,2
Contenção	0,4
Fundação	0,4
Junta de dilatação	0,2
Aterro de acesso	0,2
Laje de aproximação	0,2

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

Os danos que podem caracterizar a condição de conservação dos elementos estão apresentados na TABELA 8, com seus respectivos valores de B. A TABELA 9 indica quais danos podem ocorrer em quais elementos (marcação com x), uma vez que não são todos os tipos de danos que podem se desenvolver em todos os elementos. Por fim, para caracterização da OAE utilizando os dados provenientes do modelo EMEA/UFPR, a magnitude dos danos é retratada através dos parâmetros

K2, K3 e K4, tal como apresentado nas TABELA 4, TABELA 5 e TABELA 6 respectivamente.

TABELA 8 – MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS CONTEMPLADAS PELA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE OAES

Manifestação patológica	B
Fissura estrutural (todos os tipos)	3,0
Fissura mapeada	1,0
Mancha de fogo	1,0
Fragmentação por fogo	2,0
Mancha de umidade	1,0
Eflorescência (mancha esbranquiçada)	1,0
Estalactites devido à lixiviação	1,0
Deslocamento do concreto devido à altas tensões de compressão	4,0
Desgaste superficial	1,0
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,0
Corrosão da armadura com deslocamento de concreto	3,0
Corrosão da armadura com deslocamento e perda de seção	4,0
Corrosão da armadura com deslocamento e rompimento da barra	5,0
Armadura exposta por deficiência de cobrimento, sem corrosão	2,0
Concreto segregado	2,0
Nicho de concretagem	2,0
Forma aderida à superfície do concreto	1,0
Desalinhamento	2,0
Deslocamento	2,0
Falta de prumo	2,0
Recalque diferencial	4,0
Deformação excessiva	5,0
Descalçamento	2,0
Exposição das estacas	3,0
Deslizamento	2,0
Deslizamento gerando esforços imprevistos	3,0
Recalque do aterro de aproximação	3,0
Percolação de águas pluviais ou subterrâneas	2,0
Dano não gerando esforço imprevisto	2,0
Dano gerando esforço imprevisto	4,0
Obstrução sem causar restrição	1,0
Obstrução causando restrição	2,0
Abertura excessiva	2,0
Recapeamento irregular	2,0
Desnível	3,0
Choque de veículos	3,0
Vegetação incrustada	1,0
Corrosão em elementos metálicos	3,0
Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	4,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

TABELA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA E ELEMENTO PASSÍVEL DE OCORRÊNCIA

Manifestação patológica	Laje	Travessa	Viga longitudinal	Viga transversal	Pilar	Aparelho de apoio	Encontro	Contenção	Fundação	Junta de dilatação	Aterro de acesso	Laje de aproximação
Fissura estrutural	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Fissura mapeada	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Mancha de fogo	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Fragmentação por fogo	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Mancha de umidade	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Eflorescência	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Estalactite	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Deslocamento (alta compres.)	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Desgaste superficial	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Corrosão (apenas mancha)	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Corrosão c/ deslocamento	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Corrosão c/ perda de seção	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Corrosão c/ barra rompida	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Armadura exposta s/ corrosão	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Concreto segregado	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Nicho de concretagem	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Forma aderida ao concreto	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Desalinhamento	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	x
Deslocamento	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	x
Falta de prumo	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Recalque diferencial	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x
Deformação excessiva	x	x	x	x	x	-	x	-	x	-	-	-
Descalçamento	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x
Exposição das estacas	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Deslizamento	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	x	-
Desliz. c/ esforço imprevisto	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	x	-
Recalque do aterro de aprox.	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-
Percolação de água	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	x	-
Dano s/ esforço imprevisto	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
Dano c/ esforço imprevisto	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
Obstrução s/ causar restrição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Obstrução causando restrição	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Abertura excessiva	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Recapeamento irregular	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Desnível	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Choque de veículos	x	x	x	x	x	-	x	-	x	-	-	-
Vegetação incrustada	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-
Corrosão em elem. metálico	x	x	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-
Corrosão em elem. metálico c/ perda de seção	x	x	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-

FONTE: Adaptado de EMEA (2016 b).

Para a elaboração de cenários de falha para simulação basta criar a configuração de deterioração da OAE desejada, selecionando quais danos devem

ocorrer, com quais magnitudes, e em quais elementos, expressando essas informações através dos parâmetros B, K1, K2, K3 e K4 do modelo EMEA/UFPR conforme as TABELA 7, TABELA 8, TABELA 4, TABELA 5, e TABELA 6 respectivamente. Um cenário de degradação pode ser entendido como uma espécie de filtro ou camada a ser aplicado sobre a obra, e que é constituído por um conjunto de danos específicos que refletem as prováveis consequências para a obra caso uma dada situação hipotética futura ocorresse. Por exemplo, caso seja desejado simular um caso de poluição intensa por esgoto de um rio que passa sob um conjunto de pontes, deve-se acrescentar ao cenário, entre outras coisas, a ocorrência de corrosão nos pilares, pois se sabe que esta seria uma das principais consequências deste cenário para a obra.

Os cenários podem ser criados conforme o profissional responsável pela análise julgue interessante, dadas as características das obras a serem avaliadas, e considerando principalmente tendências futuras de uso da obra e desenvolvimento do ambiente no qual está inserida. Podem ser simulados quantos cenários de degradação forem desejados, e cada um desses apresentará um índice de vulnerabilidade específico. Entre as motivações para criação de um cenário pode-se citar:

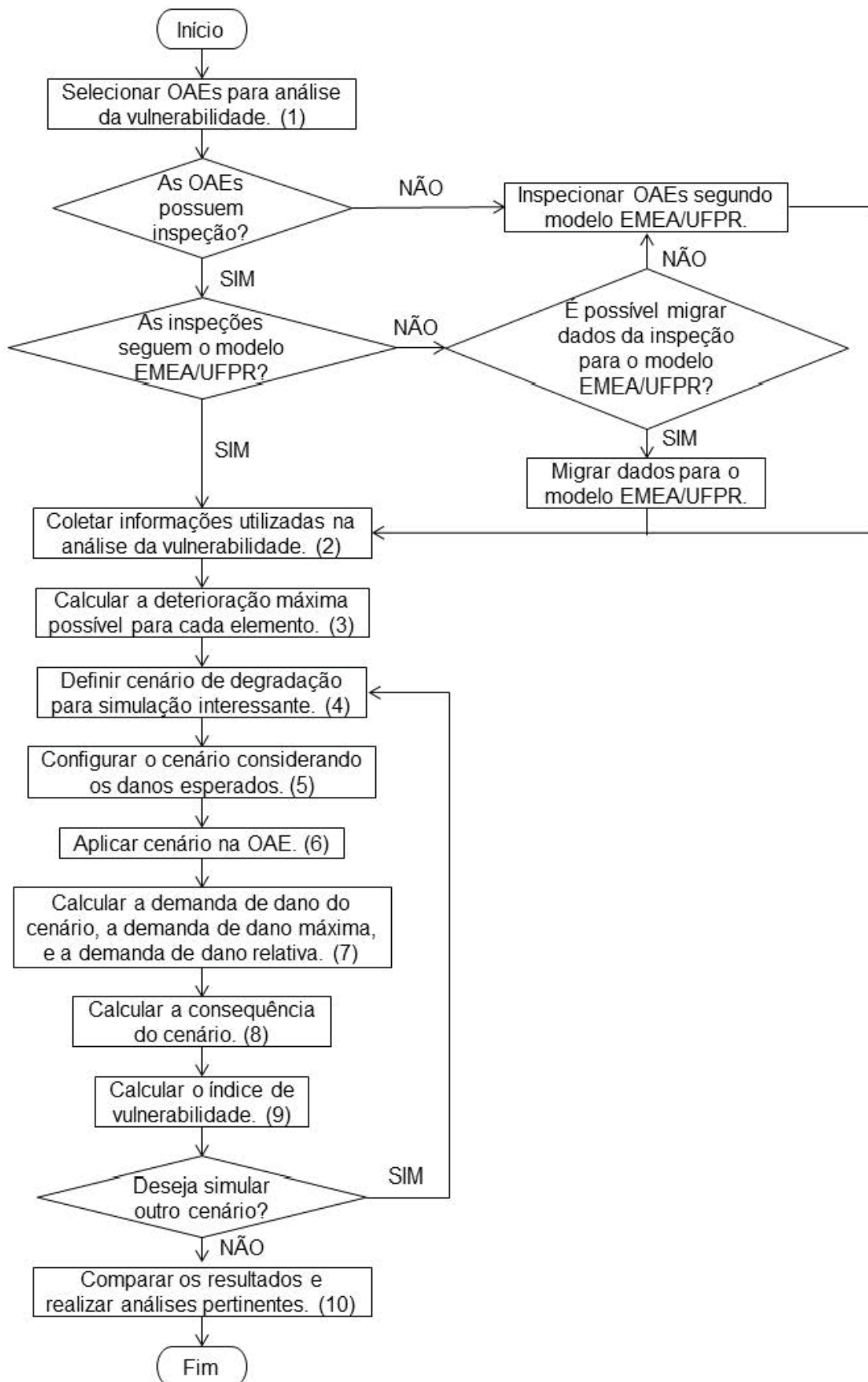
- a) Tendências de desenvolvimento urbano e/ou econômico da região onde a OAE está inserida;
- b) Tendências de comportamento do clima;
- c) Zona de agressividade ambiental a que a OAE está sujeita;
- d) Histórico de tendência de desenvolvimento de danos em OAEs dada a sua morfologia, região a que pertence, ou qualquer outro critério que permita estabelecer tal correlação (neste caso é importante a existência de um banco de dados de OAEs, para que se possa fazer essa análise);
- e) Uso de modelos de previsão de degradação do concreto.

Outro aspecto necessário para a realização da análise da vulnerabilidade é o cálculo das degradações máximas possíveis para os elementos, como citado na seção anterior. Essa determinação pode ser entendida como a aplicação de um cenário de deterioração máxima nos elementos.

Deste modo, apresentados na seção anterior a formulação matemática desenvolvida, e nesta seção o procedimento de simulação de cenários, pode-se

ilustrar a aplicação do modelo de análise da vulnerabilidade de OAEs através do fluxograma apresentado na FIGURA 8 (etapa metodológica 2.4):

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DE APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE OAEs



FONTE: A autora (2018).

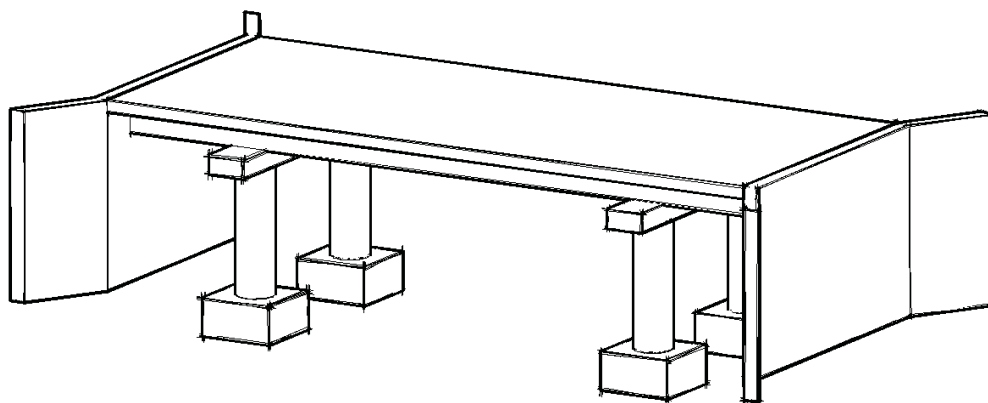
4.3 EXEMPLOS

Nesta seção são apresentados dois exemplos para demonstrar a aplicação do modelo proposto, conforme previsto na etapa 3.1 da metodologia. O primeiro exemplo consiste em uma apresentação detalhada da aplicação da análise da vulnerabilidade em uma única obra. Esta análise é, então, aplicada em outras 6 obras no segundo exemplo, para ilustrar o tipo de interpretação que deve ser realizada quando aplicada a análise da vulnerabilidade a um conjunto de OAEs. Com os dados obtidos no segundo exemplo é realizada uma análise matemática das equações desenvolvidas, que está apresentada no apêndice 2.

4.3.1 Exemplo 1: aplicação da análise de vulnerabilidade de OAEs

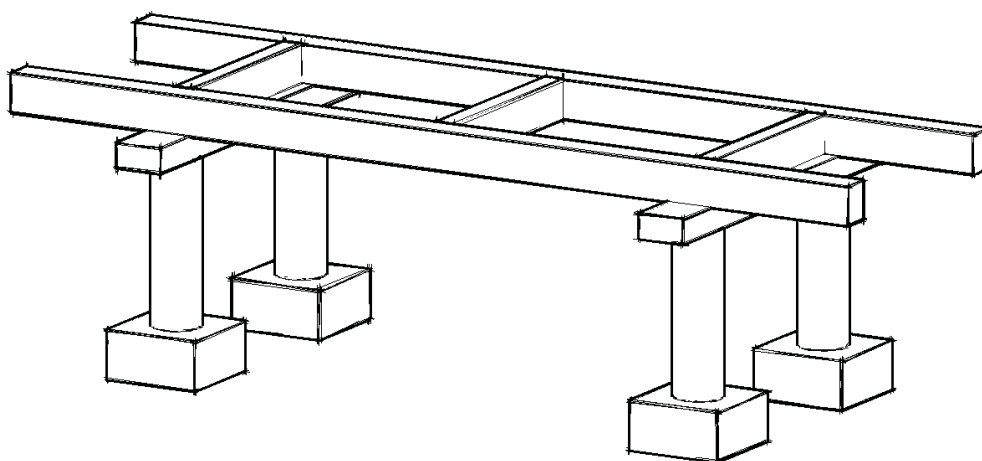
Nesta seção é apresentado um exemplo de aplicação da análise de vulnerabilidade proposta. Para objeto de estudo foi considerada uma ponte com a morfologia retratada nas FIGURA 9 e FIGURA 10, composta por 3 (três) lajes, 1 (uma) junta de dilatação, 2 (duas) vigas longitudinais, 3 (três) vigas transversais, 2 (duas) vigas travessas, 4 (quatro) aparelhos de apoio, 4 (quatro) pilares, 4 (quatro) blocos de fundação, 2 (dois) encontros, 4 (quatro) muros de contenção, e 2 (duas) lajes de acesso (processo 1 do fluxograma: seleção da OAE para análise da vulnerabilidade). Para entendimento do exemplo apresentado é necessária a compreensão prévia de que o modelo EMEA/UFPR requer que uma configuração de laje conforme a empregue no exemplo, seja considerada como dividida em três elementos: uma laje central, biapoiada nas duas vigas longitudinais, e outras duas lajes em balanço, apoiadas cada uma em uma das vigas longitudinais.

FIGURA 9 – MORFOLOGIA DA PONTE USADA NO EXEMPLO: VISTA GERAL



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 10 - MORFOLOGIA DA PONTE USADA NO EXEMPLO: VISTA GERAL COM OCULTAÇÃO DAS LAJES, ENCONTROS, E MUROS DE CONTENÇÃO



FONTE: A autora (2018).

Para fins de exemplo, cabe informar que a ponte fictícia é relativamente nova (datam 7 anos desde a sua construção), e está locada em região rural, distante de centro urbano e de qualquer outro tipo de atividade e/ou construção de grande porte. Em situação hipotética de inspeção da obra, verificou-se que a ponte apresentava os danos descritos na TABELA 10, avaliados segundo o modelo EMEA/UFPR (processo 2 do fluxograma: coletar informações utilizadas na análise da vulnerabilidade).

TABELA 10 – CONFIGURAÇÃO DE DANOS DA PONTE NO MOMENTO DA INSPEÇÃO

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Laje	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Laje	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Laje	3	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Laje	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	1,0	1,5	2,5	4,5
Travessa	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Travessa	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Travessa	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Viga longitudinal	1	Fissura estrutural	3,0	0,6	0,5	1,5	2,5	3,4
Viga longitudinal	1	Fissura mapeada	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,6	1,0	2,0	2,5	6,0
Viga longitudinal	1	Armadura exposta s/ corrosão	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	1	Concreto segregado	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	2	Mancha de umidade	1,0	0,3	1,5	1,5	2,5	1,7
Viga transversina	2	Eflorescência	1,0	0,3	0,5	1,5	2,5	0,6
Viga transversina	2	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	1,5	2,5	1,1
Viga transversina	3	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	1,5	2,5	1,1
Pilar	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Pilar	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Pilar	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	2	Armadura exposta s/ corrosão	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Pilar	3	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	3	Armadura exposta s/ corrosão	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Pilar	4	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	4	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Aparelho de apoio	1	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Aparelho de apoio	3	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Encontro	1	Vegetação incrustada	1,0	0,2	1,0	1,5	2,5	0,8
Encontro	2	Vegetação incrustada	1,0	0,2	1,0	1,5	2,5	0,8
Muro de contenção	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Muro de contenção	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Muro de contenção	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Muro de contenção	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Muro de contenção	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Muro de contenção	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Junta de dilatação	1	Recapeamento irregular	2,0	0,2	1,0	2,0	2,5	2,0
Aterro de aproximação	1	Deslizamento	2,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,0
Aterro de aproximação	1	Percolação de água	2,0	0,2	1,0	1,5	2,5	1,5
Aterro de aproximação	2	Deslizamento	2,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,0

FONTE: A autora (2018).

Dada a caracterização da obra segundo a sua morfologia e os danos que apresenta, a terceira etapa da análise consiste no cálculo dos índices de performance máximos possíveis para os elementos e para a ponte como um todo (processo 3 do fluxograma: calcular a deterioração máxima possível para cada elemento). O índice de performance máximo para cada elemento é obtido através da consideração da ocorrência de todos os danos possíveis para este (TABELA 9) com grau de intensidade média ($K_2 = 2,00$; $K_3 = 2,0$ e $K_4 = 2,5$), conforme já justificado em seção anterior deste trabalho. Consequentemente, para a OAE o índice de performance máximo é obtido através da somatória dos índices de performance máximos dos elementos que a compõem.

Nas TABELA 11, TABELA 12, e TABELA 13 são apresentados os cálculos de índice de performance máximo para laje, aparelho de apoio, e junta de dilatação respectivamente. Na TABELA 21 são apresentados os índices de performance máximo para cada um dos elementos e para a ponte utilizada no exemplo.

TABELA 11 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA LAJE

Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Fissura estrutural (todos os tipos)	3,0	0,4	2,0	2,0	2,5	12,0
Fissura mapeada	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Mancha de fogo	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Fragmentação por fogo	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Mancha de umidade	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Eflorescência (mancha esbranquiçada)	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Estalactites devido à lixiviação	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Deslocamento do concreto devido à alta tensão de compressão	4,0	0,4	2,0	2,0	2,5	16,0
Desgaste superficial	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Corrosão da armadura c/ deslocamento de concreto	3,0	0,4	2,0	2,0	2,5	12,0
Corrosão da armadura c/ deslocamento e perda de seção	4,0	0,4	2,0	2,0	2,5	16,0
Corrosão da armadura c/ deslocamento e rompimento da barra	5,0	0,4	2,0	2,0	2,5	20,0
Armadura exposta por deficiência de cobrimento, sem corrosão	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Concreto segregado	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Nicho de concretagem	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Forma aderida à superfície do concreto	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Desalinhamento	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Deslocamento	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Falta de prumo	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Deformação excessiva	5,0	0,4	2,0	2,0	2,5	20,0
Choque de veículos	3,0	0,4	2,0	2,0	2,5	12,0
Vegetação incrustada	1,0	0,4	2,0	2,0	2,5	4,0
Corrosão em elementos metálicos	3,0	0,4	2,0	2,0	2,5	12,0
Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	4,0	0,4	2,0	2,0	2,5	16,0
Índice de performance máximo	$\sum IP = 232,0$					

FONTE: A autora (2018).

TABELA 12 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA APARELHO DE APOIO

Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Dano não gerando esforço imprevisto	2,0	0,4	2,0	2,0	2,5	8,0
Dano gerando esforço imprevisto	4,0	0,4	2,0	2,0	2,5	16,0
Corrosão em elementos metálicos	3,0	0,4	2,0	2,0	2,5	12,0
Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	4,0	0,4	2,0	2,0	2,5	16,0
Índice de performance máximo	$\sum IP = 52,0$					

FONTE: A autora (2018).

TABELA 13 – ÍNDICE DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA JUNTA DE DILATAÇÃO

Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Obstrução sem causar restrição	1,0	0,2	2,0	2,0	2,5	2,0
Obstrução causando restrição	2,0	0,2	2,0	2,0	2,5	4,0
Abertura excessiva	2,0	0,2	2,0	2,0	2,5	4,0
Recapeamento irregular	2,0	0,2	2,0	2,0	2,5	4,0
Desnível	3,0	0,2	2,0	2,0	2,5	6,0
Índice de performance máximo	$\sum IP = 20,0$					

FONTE: A autora (2018).

TABELA 14 – ÍNDICES DE PERFORMANCE MÁXIMO PARA A PONTE E SEUS ELEMENTOS

Elemento	Nº de elementos	IP máximo	IP máximo X Nº de elementos
Laje	3	232,0	696,0
Viga travessa	2	232,0	464,0
Viga longitudinal	2	348,0	696,0
Viga transversina	3	174,0	522,0
Pilar	4	232,0	928,0
Aparelho de apoio	4	52,0	208,0
Encontro	2	136,0	272,0
Muro de contenção	4	200,0	800,0
Fundação	4	268,0	1072,0
Junta de dilatação	1	20,0	20,0
Aterro de acesso	2	20,0	40,0
Laje de aproximação	2	20,0	40,0
Índice de performance máximo ponte	$\sum IP = 5758,0$		

FONTE: A autora (2018).

A quarta etapa de análise é dedicada à criação de cenários de deterioração, os quais ficam a critério do gestor definir e configurar (processo 4 do fluxograma: definir cenário de degradação interessante para simulação). Para este exemplo foram configurados 3 cenários diferentes:

- Cenário A: aumento da agressividade ambiental;
- Cenário B: aumento da solicitação estrutural;
- Cenário C: aumento da frequência e intensidade de chuvas.

O cenário A busca retratar as consequências prováveis para a OAE caso ocorresse um aumento no nível de agressividade do ambiente, que poderia acontecer, por exemplo, devido ao desenvolvimento de um centro urbano ou industrial no entorno da obra. Sendo assim, este cenário é composto por danos que afetam a durabilidade dos materiais, em especial a do concreto. As manifestações patológicas julgadas condizentes com o cenário descrito, bem como os elementos em que ocorrem e as respectivas intensidades, caracterizadas segundo o modelo EMEA/UFPR, estão apresentadas na TABELA 15 (processo 5 do fluxograma: configurar o cenário considerando os danos esperados).

TABELA 15 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO A: AUMENTO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Elemento	Manifestação patológica	B	K2	K3	K4
Laje, travessa, viga longitudinal, viga transversina, pilar, encontro, muro de contenção, fundação.	Fissura mapeada	1,0	1,0	2,0	2,5
	Mancha de umidade	1,0	1,0	2,0	2,5
	Eflorescência	1,0	1,0	2,0	2,5
	Estalactite devido à lixiviação	1,0	0,5	2,0	2,5
	Corrosão (apenas mancha)	2,0	1,0	2,0	2,5
	Corrosão c/ deslocamento de concreto	3,0	0,5	2,0	2,5
	Corrosão c/ perda de seção da armadura	3,0	0,5	2,0	2,5
	Vegetação incrustada	1,0	1,0	2,0	2,5
Aparelho de apoio	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,5	1,5	2,5

FONTE: A autora (2018).

O cenário B apresenta as possíveis consequências para a OAE caso ocorresse um aumento na sua solicitação estrutural, dado pelo aumento do tráfego de cargas pesadas, que poderia ocorrer, por exemplo, se a rodovia da qual a ponte faz parte passasse a integrar uma rota de escoamento de produção agrícola ou industrial. Deste modo, este cenário é formado por danos decorrentes de sobrecarga estrutural, que estão apresentados e caracterizados na TABELA 16 (processo 5 do fluxograma).

O cenário C reflete as consequências prováveis para a OAE no caso de alterações climáticas que proporcionassem um clima mais frio e com regime de chuvas intenso, resultando em grande e constante umidade no ambiente, além proporcionar momentos de aumento do nível do rio e da intensidade de sua correnteza. Assim o cenário, apresentado na TABELA 17, é constituído por danos que afetam tanto quimicamente como fisicamente a durabilidade dos elementos, e

que possuem a presença de água como fator preponderante ou essencial para a sua ocorrência (processo 5 do fluxograma).

TABELA 16 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO B: SOBRECARGA ESTRUTURAL

Elemento	Manifestação patológica	B	K2	K3	K4
Laje, travessa, viga longitudinal, viga transversina, pilar, encontro, muro de contenção, fundação.	Fissura estrutural	3,0	1,0	2,0	2,5
	Desplacamento do concreto (alta compressão)	4,0	0,5	2,0	2,5
Fundação, laje de aproximação.	Recalque diferencial	4,0	1,0	2,0	2,5
Encontro, fundação.	Deformação excessiva	5,0	0,5	2,0	2,5
Encontro, muro de contenção, aterro.	Deslizamento	2,0	1,0	2,0	2,5
Encontro, aterro.	Recalque do aterro de aproximação	3,0	1,0	2,0	2,5
Aparelho de apoio	Dano não gerando esforço imprevisto	2,0	1,0	2,0	2,5
Junta de dilatação	Obstrução causando restrição	2,0	1,0	2,0	2,5

FONTE: A autora (2018).

TABELA 17 – CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO C: AMBIENTE COM MUITAS CHUVAS

Elemento	Manifestação patológica	B	K2	K3	K4
Laje, travessa, viga longitudinal, viga transversal, pilar, encontro, muro de contenção, fundação.	Mancha de umidade	1,0	1,0	2,0	2,5
	Estalactite devido à lixiviação	1,0	0,5	2,0	2,5
	Desgaste superficial	1,0	1,5	2,0	2,5
	Corrosão (apenas mancha)	2,0	1,0	2,0	2,5
Fundação, laje de aproximação.	Descalçamento	2,0	1,0	2,0	2,5
Encontro, muro de contenção, aterro.	Deslizamento	2,0	1,0	2,0	2,5
	Percolação de água pluvial ou subterrânea	2,0	1,5	2,0	2,5
Laje, travessa, viga longitudinal, pilar, encontro, muro de contenção, fundação.	Vegetação incrustada	1,0	1,0	2,0	2,5
Aparelho de apoio	Corrosão em elemento metálico	3,0	1,0	2,0	2,5

FONTE: A autora (2018).

Definidos e configurados os cenários, estes devem ser aplicados na ponte inspecionada. Exemplificando este processo, nas TABELA 18 e TABELA 19 são apresentadas as aplicações do cenário A na laje e no aparelho de apoio (processo 6 do fluxograma: aplicar cenário na OAE).

TABELA 18 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A NA LAJE

Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Fissura mapeada	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Eflorescência (mancha esbranquiçada)	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Estalactites devido à lixiviação	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Corrosão da armadura c/ deslocamento de concreto	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Corrosão da armadura c/ deslocamento e perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Vegetação incrustada	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Total	$\sum IP = 20,0$					

FONTE: A autora (2018).

TABELA 19 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A NO APARELHO DE APOIO

Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Corrosão em elementos metálicos	3,0	0,4	1,0	2,0	2,5	6,0
Total	$\sum IP = 52,0$					

FONTE: A autora (2018).

A “demanda de dano” é calculada conforme a Equação 16 (processo 7 do fluxograma: calcular a demanda de dano do cenário, a demanda de dano máxima, e a demanda de dano relativa.), e cabe lembrar que este parâmetro considera apenas a análise da ocorrência das manifestações patológicas previstas no cenário de deterioração, conforme exemplificado nas TABELA 20 e TABELA 21 e, para os elementos “laje 1” e “aparelho de apoio 1” respectivamente. Para cálculo da demanda de dano (processo 7 do fluxograma), caso o $IP_{inspeção}$ já seja superior ao $IP_{cenário}$ previsto, deve-se considerar que a demanda de dano é nula (igual a zero), uma vez que a ponte já apresenta o que foi pretendido simular. A “demanda de dano máxima” é calculada conforme a Equação 17 (processo 7 do fluxograma), e assim os valores são obtidos da TABELA 14, conforme demonstrado nas equações 20 e 21, para a “laje 1” e o “aparelho de apoio 1” respectivamente.

TABELA 20 – CÁLCULO DA DEMANDA DE DANO PARA O CENÁRIO A NO APARELHO DE APOIO 1

Manifestação patológica	IP cenário	IP inspeção	IP cenário - IP inspeção
Corrosão em elementos metálicos	6,00	2,25	3,75
TOTAL	6,00	2,25	3,75

FONTE: A autora (2018).

TABELA 21 – CÁLCULO DA DEMANDA DE DANO PARA O CENÁRIO A NA LAJE 1

Manifestação patológica	IP cenário	IP inspeção	IP cenário - IP inspeção
Fissura mapeada	2,00	-	2,00
Mancha de umidade	2,00	2,00	0,00
Eflorescência (mancha esbranquiçada)	2,00	0,75	1,25
Estalactites devido à lixiviação	1,00	-	1,00
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	4,00	2,00	2,00
Corrosão da armadura c/ deslocamento de concreto	3,00	2,25	0,75
Corrosão da armadura c/ deslocamento e perda de seção	4,00	-	4,00
Vegetação incrustada	2,00	-	2,00
TOTAL	20,00	7,00	13,00

OBS: o símbolo “-” representa que o dano não foi observado no elemento durante a inspeção e assim, para fins de cálculo, recebe valor 0,00 (zero).

FONTE: A autora (2018).

$$D_{MÁXIMA_{LAJE\ 1}} = IP_{MÁXIMO} = 232,00 \quad (20)$$

$$D_{MÁXIMA_{AP.\ APOIO\ 1}} = IP_{MÁXIMO} = 52,00 \quad (21)$$

Na TABELA 22 são apresentados os resultados decorrentes da aplicação do cenário A em todos os elementos e consequentemente na ponte (total) (processo 6 do fluxograma). O “IP_{cenário total}” (quinta coluna) é dado pela soma do “IP_{inspeção}” (terceira coluna) ao “IP_{cenário}” (quarta coluna). O “IP_{crítico}” (sexta coluna) é proveniente da TABELA 14.

Com os dados da TABELA 22 permitem o cálculo da demanda de dano relativa (processo 7 do fluxograma), da consequência do cenário (processo 8 do fluxograma), e do índice de vulnerabilidade (processo 9 do fluxograma), conforme as equações 22, 23 e 24.

$$C = IP_{OAE\ cenário\ total} - \frac{IP_{OAE\ cenário\ total} \times IP_{OAE\ inspeção}}{IP_{OAE\ crítico}} = 591,75 - \frac{591,75 \times 102,75}{5758,00} = 581,19 \quad (22)$$

$$D_R = \frac{D_{CENÁRIO}}{D_{MÁXIMA}} = \frac{412,38}{5658,00} = 0,0729 \quad (23)$$

$$IV = \frac{C}{D_R} = \frac{581,19}{0,0729} = 7972,43 \quad (24)$$

As aplicações dos cenários B e C estão apresentadas nas TABELA 23 e TABELA 24, respectivamente, e na TABELA 25 estão listados a demanda de dano relativa, a consequência, e o índice de vulnerabilidade de cada cenário.

TABELA 22 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO A

Elemento	Nº	IP inspeção	IP cenário	IP cenário total	IP crítico	Demanda de dano	Demanda de dano máxima
Laje	1	7,00	20,00	27,00	232,00	13,00	232,00
Laje	2	3,00	20,00	23,00	232,00	17,00	232,00
Laje	3	11,25	20,00	31,25	232,00	8,75	232,00
V. Travessa	1	5,25	20,00	25,25	232,00	14,75	232,00
V. Travessa	2	3,00	20,00	23,00	232,00	17,00	232,00
V. Longitudinal	1	16,88	30,00	46,88	348,00	22,50	348,00
V. Longitudinal	2	11,63	30,00	41,63	348,00	24,38	348,00
V. Transversina	1	0,00	15,00	15,00	174,00	15,00	174,00
V. Transversina	2	3,38	15,00	18,38	174,00	12,75	174,00
V. Transversina	3	1,13	15,00	16,13	174,00	15,00	174,00
Pilar	1	8,00	20,00	28,00	232,00	12,00	232,00
Pilar	2	4,50	20,00	24,50	232,00	17,00	232,00
Pilar	3	4,50	20,00	24,50	232,00	17,00	232,00
Pilar	4	3,00	20,00	23,00	232,00	17,00	232,00
Ap. Apoio	1	2,25	6,00	8,25	52,00	3,75	52,00
Ap. Apoio	2	0,00	6,00	6,00	52,00	6,00	52,00
Ap. Apoio	3	2,25	6,00	8,25	52,00	3,75	52,00
Ap. Apoio	4	0,00	6,00	6,00	52,00	6,00	52,00
Encontro	1	1,75	10,00	11,75	136,00	8,25	136,00
Encontro	2	1,75	10,00	11,75	136,00	8,25	136,00
Muro de Cont.	1	2,25	20,00	22,25	200,00	17,75	200,00
Muro de Cont.	2	2,25	20,00	22,25	200,00	17,75	200,00
Muro de Cont.	3	2,25	20,00	22,25	200,00	17,75	200,00
Muro de Cont.	4	0,00	20,00	20,00	200,00	20,00	200,00
Fundação	1	0,00	20,00	20,00	268,00	20,00	268,00
Fundação	2	0,00	20,00	20,00	268,00	20,00	268,00
Fundação	3	0,00	20,00	20,00	268,00	20,00	268,00
Fundação	4	0,00	20,00	20,00	268,00	20,00	268,00
Junta	1	2,00	0,00	2,00	20,00	0,00	-
Aterro de Aces.	1	2,50	0,00	2,50	20,00	0,00	-
Aterro de Aces.	2	1,00	0,00	1,00	20,00	0,00	-
Laje de Aprox.	1	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	-
Laje de Aprox.	2	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	-
TOTAL (ponte)	-	102,75	489,00	591,75	5758,00	412,38	5658,00

FONTE: A autora (2018).

TABELA 23 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO B

Elemento	Nº	IP inspeção	IP cenário	IP cenário total	IP crítico	Demanda de dano	Demanda de dano máxima
Laje	1	7,00	15,00	22,00	232,00	15,00	232,00
Laje	2	3,00	15,00	18,00	232,00	15,00	232,00
Laje	3	11,25	15,00	26,25	232,00	15,00	232,00
V. Travessa	1	5,25	15,00	20,25	232,00	15,00	232,00
V. Travessa	2	3,00	15,00	18,00	232,00	15,00	232,00
V. Longitudinal	1	16,88	22,50	39,38	348,00	19,13	348,00
V. Longitudinal	2	11,63	22,50	34,13	348,00	22,50	348,00
V. Transversina	1	0,00	11,25	11,25	174,00	11,25	174,00
V. Transversina	2	3,38	11,25	14,63	174,00	11,25	174,00
V. Transversina	3	1,13	11,25	12,38	174,00	11,25	174,00
Pilar	1	8,00	15,00	23,00	232,00	15,00	232,00
Pilar	2	4,50	15,00	19,50	232,00	15,00	232,00
Pilar	3	4,50	15,00	19,50	232,00	15,00	232,00
Pilar	4	3,00	15,00	18,00	232,00	15,00	232,00
Ap. Apoio	1	2,25	4,00	6,25	52,00	4,00	52,00
Ap. Apoio	2	0,00	4,00	4,00	52,00	4,00	52,00
Ap. Apoio	3	2,25	4,00	6,25	52,00	4,00	52,00
Ap. Apoio	4	0,00	4,00	4,00	52,00	4,00	52,00
Encontro	1	1,75	12,50	14,25	136,00	12,50	136,00
Encontro	2	1,75	12,50	14,25	136,00	12,50	136,00
Muro de Cont.	1	2,25	14,00	16,25	200,00	14,00	200,00
Muro de Cont.	2	2,25	14,00	16,25	200,00	14,00	200,00
Muro de Cont.	3	2,25	14,00	16,25	200,00	14,00	200,00
Muro de Cont.	4	0,00	14,00	14,00	200,00	14,00	200,00
Fundação	1	0,00	23,0	23,00	268,00	23,00	268,00
Fundação	2	0,00	23,0	23,00	268,00	23,00	268,00
Fundação	3	0,00	23,00	23,00	268,00	23,00	268,00
Fundação	4	0,00	23,00	23,00	268,00	23,00	268,00
Junta	1	2,00	2,00	4,00	20,00	2,00	20,00
Aterro de Aces.	1	2,50	5,0	7,50	20,00	4,00	20,00
Aterro de Aces.	2	1,00	5,0	6,00	20,00	4,00	20,00
Laje de Aprox.	1	0,00	4,00	4,00	20,00	4,00	20,00
Laje de Aprox.	2	0,00	4,00	4,00	20,00	4,00	20,00
TOTAL (ponte)	-	102,75	422,75	525,50	5758,00	417,38	5758,00

FONTE: A autora (2018).

TABELA 24 – APLICAÇÃO DO CENÁRIO C

Elemento	Nº	IP inspeção	IP cenário	IP cenário total	IP crítico	Demanda de dano	Demanda de dano máxima
Laje	1	7,00	14,00	21,00	232,00	10,00	232,00
Laje	2	3,00	14,00	17,00	232,00	11,00	232,00
Laje	3	11,25	14,00	25,25	232,00	8,00	232,00
V. Travessa	1	5,25	14,00	19,25	232,00	11,00	232,00
V. Travessa	2	3,00	14,00	17,00	232,00	11,00	232,00
V. Longitudinal	1	16,88	21,00	37,88	348,00	15,00	348,00
V. Longitudinal	2	11,63	21,00	32,63	348,00	16,88	348,00
V. Transversina	1	0,00	9,00	9,00	174,00	9,00	174,00
V. Transversina	2	3,38	9,00	12,38	174,00	7,31	174,00
V. Transversina	3	1,13	9,00	10,13	174,00	9,00	174,00
Pilar	1	8,00	14,00	22,00	232,00	9,00	232,00
Pilar	2	4,50	14,00	18,50	232,00	12,00	232,00
Pilar	3	4,50	14,00	18,50	232,00	12,00	232,00
Pilar	4	3,00	14,00	17,00	232,00	12,00	232,00
Ap. Apoio	1	2,25	6,00	8,25	52,00	3,75	52,00
Ap. Apoio	2	0,00	6,00	6,00	52,00	6,00	52,00
Ap. Apoio	3	2,25	6,00	8,25	52,00	3,75	52,00
Ap. Apoio	4	0,00	6,00	6,00	52,00	6,00	52,00
Encontro	1	1,75	12,00	13,75	136,00	10,25	136,00
Encontro	2	1,75	12,00	13,75	136,00	10,25	136,00
Muro de Cont.	1	2,25	24,00	26,25	200,00	21,75	200,00
Muro de Cont.	2	2,25	24,00	26,25	200,00	21,75	200,00
Muro de Cont.	3	2,25	24,00	26,25	200,00	21,75	200,00
Muro de Cont.	4	0,00	24,00	24,00	200,00	24,00	200,00
Fundação	1	0,00	18,0	18,00	268,00	18,00	268,00
Fundação	2	0,00	18,0	18,00	268,00	18,00	268,00
Fundação	3	0,00	18,00	18,00	268,00	18,00	268,00
Fundação	4	0,00	18,00	18,00	268,00	18,00	268,00
Junta	1	2,00	0,00	2,00	20,00	0,00	-
Aterro de Aces.	1	2,50	5,0	7,50	20,00	2,50	20,00
Aterro de Aces.	2	1,00	5,0	6,00	20,00	4,00	20,00
Laje de Aprox.	1	0,00	2,00	2,00	20,00	2,00	20,00
Laje de Aprox.	2	0,00	2,00	2,00	20,00	2,00	20,00
TOTAL (ponte)	-	102,75	425,00	527,75	5758,00	364,94	5738,00

FONTE: A autora (2018).

TABELA 25 – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Cenário	Consequência	Demanda de dano relativa	Índice de vulnerabilidade
A	581,19	0,0729	7974,23
B	516,12	0,0725	7120,30
C	518,33	0,0636	8149,84

FONTE: A autora (2018).

Através dos resultados expressos na TABELA 25 é possível observar que o cenário de deterioração com maior vulnerabilidade para a ponte em estudo é o cenário C, que apesar de ter uma consequência relativamente baixa, se comparada com o cenário A, apresenta a menor demanda de dano relativa, ou seja, demanda

menor deterioração na obra para ocorrer (processo 10 do fluxograma: comparar os resultados e realizar análises pertinentes). Deste modo poderiam ser tomadas ações preventivas relacionadas à ocorrência dos danos citados no cenário, como a manutenção e reforço do sistema de drenagem da obra para evitar a incidência de água na estrutura.

Pode-se verificar, também, que neste caso os valores de demanda de dano relativa mostraram-se inversamente proporcionais aos valores de índice de vulnerabilidade, porém trata-se apenas de uma coincidência deste exemplo. Como é apresentado no apêndice 2, para o próximo exemplo, os valores de consequência e índice de vulnerabilidade não demonstraram tendências de comportamento similares.

Apesar de ser possível desenvolver algumas análises e tirar conclusões através da aplicação de diferentes cenários em uma mesma obra, a aplicação da análise de vulnerabilidade mostra-se mais interessante quando realizada em grupo de pontes, para que então possam ser feitas comparações entre estas obras, e que assim este índice seja mais um dado que auxilie o gestor na tomada de decisão de gerenciamento. Deste modo será apresentado um segundo exemplo onde os mesmos cenários apresentados anteriormente serão aplicados a outras 6 obras, com a mesma morfologia, porém com estados de conservação diferenciados.

4.3.2 Exemplo 2: análise da vulnerabilidade de um conjunto de OAEs

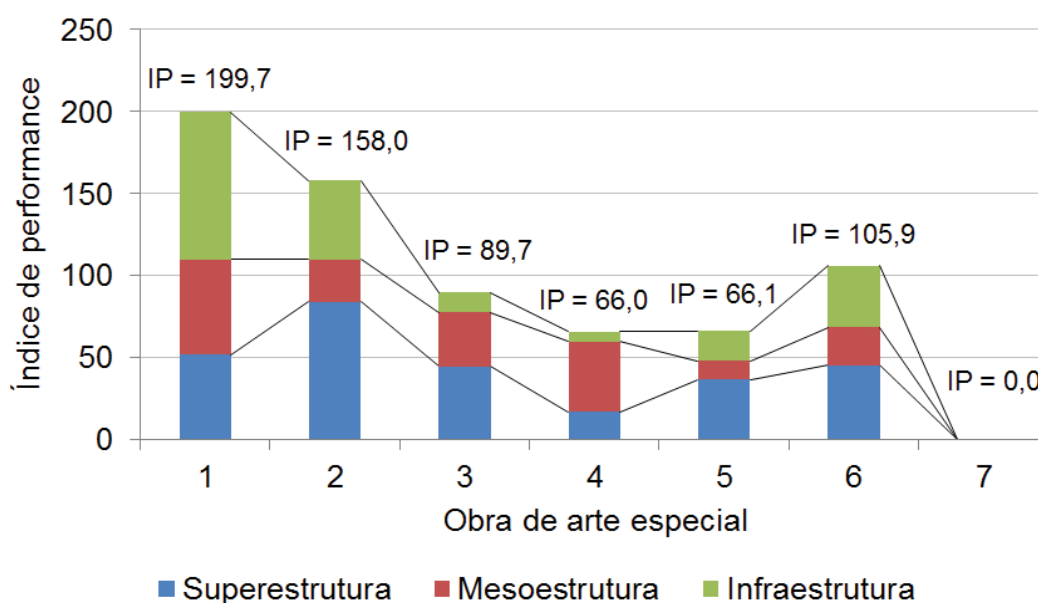
Nesta continuação do exemplo apresentado, os três cenários já descritos (TABELA 15, TABELA 16 e TABELA 17) (processo 4 do fluxograma) são aplicados a mais seis obras, com a mesma morfologia da ponte anterior (FIGURA 9 e FIGURA 10), porém com estados de conservação completamente distintos (processo 1 do fluxograma: seleção das OAEs para análise da vulnerabilidade). Uma vez que a aplicação detalhada dos cenários de deterioração já foi realizada na etapa anterior do exemplo, neste momento este procedimento é feito com menor detalhamento, de modo mais direto, objetivando explorar com maior atenção o estudo final dos resultados decorrentes da aplicação da análise da vulnerabilidade.

As sete obras aqui analisadas foram identificadas com números que vão de 1 a 7, sendo que a ponte número 3 é a mesma apresentada na primeira parte deste exemplo. A listagem detalhada dos danos apresentados por cada uma das pontes

no momento da inspeção está disponível no Apêndice 1 deste trabalho (processo 2 do fluxograma: coletar informações utilizadas na análise da vulnerabilidade). Cabe observar que a configuração de danos da ponte 3 já foi descrita anteriormente na TABELA 10, e que a ponte de número 7 está em perfeito estado de conservação, não tendo apresentado danos no momento da inspeção.

A FIGURA 11 permite observar o índice de performance de cada grupo de elementos e o índice de performance geral da OAE (descrito acima de cada coluna), lembrando que quanto maior é o índice de performance, pior é o estado de conservação da obra. A superestrutura abrange laje, vigas longitudinal e transversal e junta de dilatação; a mesoestrutura contempla pilar, aparelho de apoio e travessa; por fim a infraestrutura abriga encontro, muro de contenção, fundação e aterro de acesso.

FIGURA 11 – RESUMO DO ÍNDICE DE PERFORMANCE DAS OBRAS ESTUDADAS



FONTE: A autora (2018).

Os dados apresentados na figura supracitada permitem inferir que a ponte 1 é a mais danificada, e que os elementos da infraestrutura são os que mais estão colaborando para esse índice de performance ruim. A segunda ponte mais danificada é a OAE 2, que apresenta problemas principalmente nos elementos da superestrutura. Na sequência a terceira pior obra quanto ao nível de conservação é a OAE 6, que é seguida pela OAE 3. As pontes 3 e 4 apresentam índice de

performance em valor absoluto bastante próximo, e a OAE 7, como já informado, não apresenta danos.

Deve-se observar que além da diferença no valor total do índice de performance, as obras apresentam diferentes tipos de danos. A ponte 1, por exemplo, apresenta 3 tipos principais de danos: fissura, mancha e corrosão; enquanto a ponte 2 apresenta além destes também defeitos construtivos. Nas pontes 3 e 4 os tipos de dano mais recorrentes são corrosão e manchas, na ponte 5 as maiores incidências são de defeitos construtivos, e na ponte 6 a maior incidência é de, além de defeitos construtivos, fissuras, e deteriorações do concreto.

Foram aplicados os três cenários (TABELA 15, TABELA 16 e TABELA 17) nas sete obras (processo 6 do fluxograma), e os resultados obtidos estão listados na TABELA 26 (processos 7, 8 e 9 do fluxograma). No GRÁFICO 4 são apresentados os índices de vulnerabilidade que cada ponte apresentou em decorrência da aplicação dos diferentes cenários de deterioração em estudo, e também é exposto o índice de performance, calculado segundo com o modelo EMEA/UFPR, oriundo do relatório de danos da inspeção de cada obra.

GRÁFICO 4 – ÍNDICE DE PERFORMANCE POR PONTE VERIFICADO NA INSPEÇÃO; E ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE CADA CENÁRIO POR PONTE

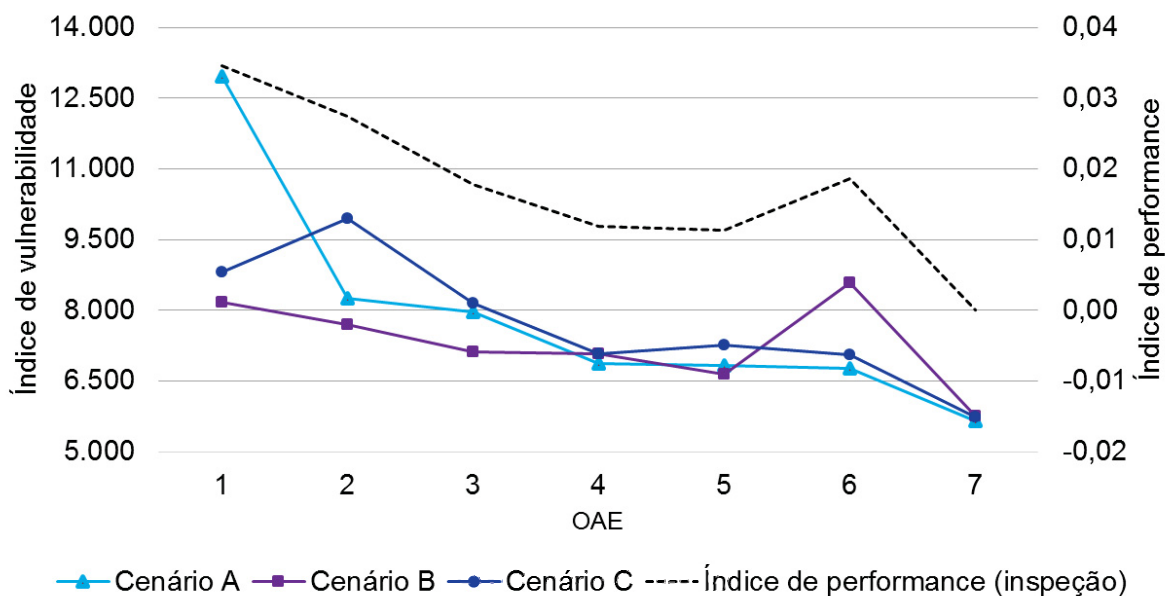


TABELA 26 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS NAS PONTES

Ponte	Cenário	Consequência do cenário	Demanda de dano relativa	Índice de vulnerabilidade
1	A	664,22	0,0513	12959,21
	B	600,26	0,0734	8175,77
	C	602,43	0,0683	8818,28
2	A	629,25	0,0762	8260,50
	B	564,81	0,0734	7692,96
	C	567,00	0,0570	9949,42
3	A	581,19	0,0729	7974,23
	B	516,12	0,0725	7120,30
	C	518,33	0,0636	8149,87
4	A	550,98	0,0802	6870,39
	B	485,52	0,0687	7070,80
	C	487,74	0,0688	7085,22
5	A	548,14	0,0802	6832,12
	B	482,64	0,0726	6644,44
	C	484,86	0,0666	7274,78
6	A	584,92	0,0864	6767,90
	B	519,91	0,0606	8583,85
	C	522,11	0,0741	7049,15
7	A	489,00	0,0864	5658,00
	B	422,75	0,0734	5758,00
	C	425,00	0,0741	5738,00

FONTE: A autora (2018).

As informações sintetizadas no GRÁFICO 4 são o principal resultado decorrente da aplicação da análise da vulnerabilidade, sendo a base para estudo e tomada de decisões no âmbito do gerenciamento de OAEs.

O primeiro aspecto a ser observado no GRÁFICO 4 é a distinção total entre os valores e a tendência de comportamento, do índice de performance do modelo EMEA/UFPR, e dos índices de vulnerabilidade obtidos para cada um dos diferentes cenários de deterioração (etapa metodológica 3.2). Este fato evidencia que, apesar de os índices de vulnerabilidade e performance serem obtidos a partir dos mesmos dados de entrada, e inclusive o índice de vulnerabilidade ser obtido por diferentes considerações e aplicações do índice de performance (ora para a ponte, ora para elemento, ora para todos os danos, ora para danos específicos, etc.), os dois índices fornecem resultados e proporcionam análises completamente distintos uma vez que tratam os dados de entrada de formas diferentes.

O que se pretende não é o uso de uma análise em detrimento da outra (modelo EMEA/UFPR vs. análise de vulnerabilidade), e sim o uso em conjunto de ambas, objetivando selecionar de forma estratégica OAEs para reparo e

manutenção. O índice de performance do modelo EMEA/UFPR permite um ranqueamento das obras segundo o seu estado de conservação, sendo uma avaliação do momento presente da obra, já a análise da vulnerabilidade permite a simulação do comportamento futuro da obra frente a cenários que possam ocorrer, dado o seu estado atual. Assim recomenda-se que a análise da vulnerabilidade seja um estudo complementar à aplicação do modelo EMEA/UFPR na tomada de decisão sobre destinação de recursos financeiros para a recuperação de OAEs, em casos que esta se mostre interessante.

A segunda questão a ser abordada é a comparação apenas entre os cenários de deterioração. Pode-se observar que para cada cenário de deterioração as obras apresentam diferentes índices de vulnerabilidade, não sendo possível identificar qualquer tendência de comportamento por cenário ou obra, uma vez que os valores dos índices resultam da combinação de características específicas da obra, do seu estado de conservação, e do cenário simulado.

No exemplo ilustrado no GRÁFICO 4 tem-se que no caso de ocorrência futura do cenário A, a ponte que apresenta maior vulnerabilidade, e assim deveria ser priorizada nas operações de manutenção e readequação, é a ponte identificada pelo número 1 (processo 10 do fluxograma: comparar os resultados e realizar análises pertinentes). Já para o cenário B a ponte mais vulnerável é a 6, e para o cenário C é a ponte 2. Pode-se observar ainda que para a ponte 7, que possui índice de performance nulo uma vez que não apresentou danos no momento da inspeção, o índice de vulnerabilidade é o mesmo para todos os cenários. Por fim, para auxiliar a visualização destes comportamentos, na TABELA 27 – estão ordenadas as obras segundo o índice de vulnerabilidade por cenário, da mais vulnerável para a menos.

No Apêndice 2 é apresentada uma análise matemática dos dados obtidos neste exemplo, para ilustrar o comportamento dos parâmetros que culminam no índice de vulnerabilidade.

Ranking	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
	Ponte	IV Cenário A	Ponte	IV Cenário B	Ponte	IV Cenário C
1º	1	12959,21	6	8583,85	2	9949,42
2º	2	8260,50	1	8175,77	1	8818,28
3º	3	7974,23	2	7692,96	3	8149,87
4º	4	6870,39	3	7120,30	5	7274,78
5º	5	6832,12	4	7070,80	4	7085,22
6º	6	6767,90	5	6644,44	6	7049,15
7º	7	5658,00	7	5758,00	7	5738,00

FONTE: A autora (2018).

5 CONCLUSÕES

O estudo inicial sobre a viabilidade da realização de uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural para avaliação de OAEs foi realizado por Domingues (2016), que propôs dois modelos: um focado na parte estrutural e outro na parte funcional das OAEs. As conclusões do referido trabalho indicavam a necessidade de consolidação dos modelos propostos, maior desenvolvimento dos conceitos utilizados, e validação destes através da aplicação em estruturas reais, para que se pudesse estudar o comportamento dos resultados obtidos e realizar os ajustes necessários.

No presente trabalho, continuando a pesquisa iniciada em 2016, o foco foi direcionado para o desenvolvimento da análise da vulnerabilidade dos elementos de função estrutural, dada a sua importância para o funcionamento da OAE. Todavia, entende-se que pode ser criada uma análise similar que considere, então, a avaliação dos aspectos funcionais, como sistema de drenagem, iluminação, dispositivos de segurança, etc. Acredita-se que a consideração de ambos os aspectos, estrutural e funcional, no mesmo modelo não é viável, pois o significado e a interpretação dados para os conceitos envolvidos na análise não seriam adequados para o campo da funcionalidade destas estruturas.

O estudo aqui apresentado dedicou-se à interpretação e adaptação dos conceitos envolvidos na análise de vulnerabilidade (demandas de dano, consequência, e índice de vulnerabilidade), e ao desenvolvimento de formulações matemáticas que traduzissem numericamente estes conceitos. Após um processo extenso e cíclico de estudo dos conceitos envolvidos, suposição de hipóteses, desenvolvimento de equações e realização de testes, acredita-se que a formulação proposta é adequada para o objetivo pretendido.

O modelo proposto se destaca por proporcionar uma análise que vai além da simples avaliação do estado de conservação da obra no momento presente, permitindo que seja feita uma simulação do comportamento da OAE frente a possível ocorrência de diferentes cenários de uso. As simulações de comportamento futuro são feitas através de dados de entrada simples, obtidos em inspeções rotineiras, sem a necessidade da existência de bancos de dados robustos e modelos probabilísticos, o que é requerido na maioria dos modelos de previsão de comportamento futuro, porém é um aspecto distante da realidade da maioria dos

países. A simulação de cenários permite fazer considerações tanto sobre ações previsíveis e esperadas, como a degradação natural dos elementos, quanto sobre ações imprevisíveis, tal como o choque de um veículo contra um pilar.

Nos exemplos apresentados fica demonstrada a relevância da análise tanto para a avaliação de uma única OAE, quanto para a avaliação de um grupo de obras. A análise da vulnerabilidade pode ser aplicada a uma única obra, simulando-se quantos cenários sejam desejados, e assim avaliando o comportamento da obra frente às diferentes possibilidades. A outra possibilidade é a aplicação de um mesmo cenário à um grupo de obras, sendo possível observar quais as obras de maior vulnerabilidade dada a ocorrência deste evento futuro simulado.

O modelo, como foi estruturado, mostra-se bastante flexível não só para a sua adaptação à diferentes realidades, como pelo acréscimo de diferentes danos e elementos, mas também para adaptação à avaliação de outros tipos de obras. Todavia, um ponto importante a ser analisado em estudos futuros é o comportamento do modelo quando aplicado em um grupo de obras com morfologias distintas. A formulação como foi estabelecida deve permitir esta comparação entre diferentes obras, uma vez que os parâmetros de consequência e demanda de dano relativa são relativizados através de comparação com valores máximos que cada morfologia específica permite. Já foram realizados testes neste sentido que resultaram no atendimento a esse aspecto, todavia um estudo aprofundado é necessário.

Os testes realizados ao longo do desenvolvimento do modelo, e também os exemplos apresentados no presente trabalho, foram feitos com auxílio de planilha eletrônica. Mesmo buscando otimizar o processo de cálculo na planilha desenvolvida, a realização da análise ainda não ocorre de maneira facilitada, uma vez que para cada morfologia diferente são necessárias uma série de alterações no formulário de cálculo. Deste modo está em fase de desenvolvimento um algoritmo computacional que execute a análise.

Ainda, para continuidade do presente estudo sugere-se, primeiramente, a aplicação do modelo em obras reais, buscando a validação do mesmo, e a otimização da escolha dos cenários de falha a serem aplicados. Na sequência deve ser continuado o desenvolvimento de outros aspectos relacionados à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, como a descrição hierárquica da estrutura e respectivas regras de agrupamento, e a sua representação através de grafos.

A aplicação do modelo em um maior número de pontes é necessária também, para que se possa realizar um estudo sobre os valores máximos e mínimos que os parâmetros de consequência, demanda de dano relativa e, consequentemente, índice de vulnerabilidade podem atingir.

Novamente reforça-se o papel da análise de vulnerabilidade como um complemento à aplicação do modelo EMEA/UFPR, uma vez que se tratam de interpretações dos dados oriundos de inspeção completamente distintas. Enquanto o modelo EMEA/UFPR permite um ranqueamento das obras segundo a urgência de reparo com base nos estados de conservação verificados, a análise da vulnerabilidade indica as obras mais vulneráveis dada a consideração da ocorrência de um cenário futuro hipotético. Ou seja, o modelo EMEA/UFPR é uma avaliação do estado presente da obra, e a análise da vulnerabilidade é uma avaliação do seu estado futuro. Assim, não se pretende ter o uso de uma análise em detrimento da outra (modelo EMEA/UFPR vs. análise de vulnerabilidade), e sim o uso em conjunto de ambas, objetivando selecionar de forma estratégica OAEs para reparo e manutenção, auxiliando na tomada de decisão sobre destinação de recursos financeiros para a recuperação de OAEs.

Por fim, conclui-se que modelos de avaliação e análise de OAEs, tal como o modelo EMEA/UFPR e o modelo proposto neste estudo, são de grande valia no processo de tomada de decisão em ferramentas de gestão destas obras, uma vez que integram de modo otimizado as esferas técnica e de gestão. Isso ocorre pois o profissional técnico, que possui conhecimento específico sobre OAEs, alimenta o sistema com dados e análises relevantes, que são utilizados pelo gestor, que possui habilidades de gerenciamento, na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, J.; BLOCKLEY, D.; WOODMAN, N. Vulnerability of 3-dimensional trusses. **Structural Safety**, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 203-220, jan. 2001.

_____. Vulnerability of structural systems. **Structural Safety**, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 263-286, jul. 2003.

AKGUL, F. Development of a bridge management system incorporating a newly developed model for element condition evaluation based on damage effects. **Structure And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 12, p.1206-1224, dez. 2013.

AMINI, A.; NIKRAZ, N.; FATHIZADEH, A. Identifying and evaluating the effective parameters in prioritization of urban roadway bridges for maintenance operations. **Australian Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.23-34, 14 dez. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

BAKKER, J. D; VOLWERK, J. J. TISBO Infrastructure Maintenance Management System: Integrating Inspection Registration and Maintenance Management. In: INTERNATIONAL BRIDGE MANAGEMENT CONFERENCE, 9., 2003, Orlando. **Proceedings...** . Washington: Transportation Research Board, 2003. p. 61 - 69.

COLLINS, T. J.; BREEN, R. P. Ireland's Bridge Management System. **Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety**, [s.l.], p.1-5, 10 out. 2006.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON (CEB). **Bulletin 243**: Strategies for testing and assessment of concrete structures. Suíça, 1998.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte**: Estatísticas Consolidadas 2016. Brasília: CNT, 2016.

_____. **Boletim Econômico Detalhado**: Janeiro de 2017. Brasília: CNT, 2017.

CZEPIEL, E. **Bridge management systems literature review and search**. 11. ed. Evanston: BIRL Industrial Research Laboratory, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**: conteúdo 05 - drenagem e obras de arte correntes. Brasília, 2017.

_____. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. Rio de Janeiro, 2004.

DOMINGUES, G. B. **Proposta de Análise da Vulnerabilidade de Obras de Arte Especiais**. 2016. 170 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ENGLAND, J.; AGARWAL, J.; BLOCKLEY, D. The vulnerability of structures to unforeseen events. **Computers & Structures**, [s.l.], v. 86, n. 10, p. 1042-1051, maio 2008.

ESCRITÓRIO MODELO DE ENGENHARIA CIVIL (EMEA). Banco de dados. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016 a.

ESCRITÓRIO MODELO DE ENGENHARIA CIVIL (EMEA). **Diretrizes para Inspeção de Obras de Arte Especiais**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016 b.

European Comission, Directorate General Transport. **COST 345**: Procedures Required for Assessing Highway Structures. [s.l.]: Community Research And Development Information Service (CORDIS), 2007. 172 p. Disponível em: <<https://bit.ly/2kOy4jH>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

FEDERAL DEPARTMENT OF HIGHWAYS. **KUBA-MS-Ticino**: User's manual, Release 1.0. Berna: Eidg. Dr. Sachen Und Materialzentrale, 1998.

GHOLAMI, M.; SAM, A. R. B. M.; YATIM, J. M. Assessment of bridge management system in Iran. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 54, p.573-583, 2013.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2009.

KLATTER, L.; VROUWENVELDER, T.; VAN NOORTWIJK, J. M. Societal and reliability aspects of bridge management in the Netherlands. **Structure And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.11-24, fev. 2009.

KUZNETSOV, V. M. et al. Bridge Management System for City of Moscow. In: INTERNATIONAL BRIDGE MANAGEMENT CONFERENCE, 9., 2003, Orlando. **Proceedings...** . Washington: Transportation Research Board, 2003. p. 96 - 101.

LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991.

MINCHIN, R. E. et al. Best practices of bridge system management - A synthesis. **Journal Of Management In Engineering**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.186-195, out. 2006.

MUÑOZ, E.; GÓMEZ, D. Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. **Revista Ingeniería de Construcción**, Colômbia, v. 28, n. 1, p.37-62, jan. 2013.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Bridge Management**. França: Road Research Group, 1992.

PELLEGRINO, C.; PIPINATO, A.; MODENA, C.. A simplified management procedure for bridge network maintenance. **Structure And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 7, n. 5, p.341-351, maio 2011.

PINTO, J.; BLOCKLEY, D.; WOODMAN, N. The risk of vulnerable failure. **Structural Safety**, [s.l.], v. 24, n. 2-4, p.107-122, abr. 2002.

PONOMAREV, Y. et al. Specific features of standard inspection of bridge structures in Moscow, Russia. **Bridge Structures**, [s.l.], v. 2, n. 1, p.35-43, mar. 2006.

RADIĆ, J.; BLEIZIFFER, J.; TKALČIĆ, D. Maintaining safety and serviceability of concrete bridges in Croatia. **Bridge Structures**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.327-344, set. 2005.

RASHIDI, M.; SAMALI, B.; SHARAFI, P. A new model for bridge management: Part A. **Australian Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.35-45, 20 dez. 2015.

RENS, K. L.; NOGUEIRA, C. L.; TRANSUE, D. J. Bridge management and nondestructive evaluation. **Journal Of Performance Of Constructed Facilities**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.3-16, fev. 2005.

ROELFSTRA, G. et al. Condition evolution in bridge management systems and corrosion-induced deterioration. **Journal Of Bridge Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.268-277, maio 2004.

RYALL, M. J. **Bridge Management**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

SAFI, M. et al. Development of the Swedish bridge management system by upgrading and expanding the use of LCC. **Structure And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 12, p.1240-1250, dez. 2013.

SALEH, A. M.; MANSOUR, O. A.; ABBAS, O. S. Toward an egyptian bridge management system. **Housing And Building National Research Center Journal**, Egito, v. 9, n. 3, p.227-234, dez. 2013.

SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. **Métodos de pesquisa nas relações sociais**. São Paulo: Herder, 1967.

SHIROLÉ, A. M. Bridge management to the year 2020 and beyond. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 2202, n. 1, p.159-164, jan. 2010.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **NCHRP Synthesis 375**: bridge inspection practices, a synthesis of highway practice. Washington: Transportation Research Board, 2007.

VALENZUELA, S.; SOLMINIHAC, H.; ECHAVEGUREN, T. Proposal of an integrated index for prioritization of bridge maintenance. **Journal Of Bridge Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 3, p.337-343, maio 2010.

WU, X.; BLOCKLEY, D. I.; WOODMAN, N. J. Vulnerability of structural systems part 2: failure scenarios. **Civil Engineering Systems**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.319-333, out. 1993.

YANEV, B. **Bridge management**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 312 p.

APÊNDICE 1 – CONFIGURAÇÃO DE DANOS DAS PONTES UTILIZADAS NO EXEMPLO, NO MOMENTO DA INSPEÇÃO

- Configuração de danos da ponte 1 no momento da inspeção:

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	2	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Laje	2	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	3	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	3	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Laje	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Laje	3	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	2	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Travessa	2	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Viga longitudinal	1	Fissura mapeada	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	1	Eflorescência	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	1	Vegetação incrustada	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	2	Fissura mapeada	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	2	Eflorescência	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga longitudinal	2	Vegetação incrustada	1,0	0,6	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	1	Fissura mapeada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	1	Eflorescência	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,3	0,5	2,0	2,5	2,3
Viga transversina	1	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,3	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	1	Vegetação incrustada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	2	Fissura mapeada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	2	Eflorescência	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,3	0,5	2,0	2,5	2,3
Viga transversina	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,3	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	2	Vegetação incrustada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	3	Fissura mapeada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	3	Eflorescência	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Viga transversina	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,3	0,5	2,0	2,5	2,3
Viga transversina	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,3	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	3	Vegetação incrustada	1,0	0,3	0,5	2,0	2,5	0,8
Pilar	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Pilar	1	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Pilar	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	2	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Pilar	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Pilar	2	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	3	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	3	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Pilar	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Pilar	3	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	4	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	4	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	4	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Pilar	4	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Pilar	4	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Aparelho de apoio	1	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Aparelho de apoio	2	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Aparelho de apoio	3	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Aparelho de apoio	4	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Encontro	1	Fissura mapeada	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	1	Eflorescência	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5
Encontro	1	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,2	0,5	2,0	2,5	2,0
Encontro	1	Vegetação incrustada	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	2	Fissura mapeada	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	2	Eflorescência	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5
Encontro	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,2	0,5	2,0	2,5	2,0
Encontro	2	Vegetação incrustada	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Muro de contenção	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Muro de contenção	1	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	2	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Muro de contenção	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	2	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	3	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	3	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Muro de contenção	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	3	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	4	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	4	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	4	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Muro de contenção	4	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	4	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	1	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Fundação	1	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Fundação	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	2	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	2	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	2	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Fundação	2	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Fundação	2	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	3	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Fundação	3	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Fundação	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Fundação	3	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	4	Fissura mapeada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	4	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	4	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	2,0	2,5	3,0
Fundação	4	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	2,0	2,5	4,0
Fundação	4	Vegetação incrustada	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0

- Configuração de danos da ponte 2 no momento da inspeção:

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Desgaste superficial	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Laje	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	1	Nicho de concretagem	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	2	Desgaste superficial	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Laje	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	2	Nicho de concretagem	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	3	Desgaste superficial	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Laje	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Laje	3	Nicho de concretagem	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Travessa	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Travessa	1	Nicho de concretagem	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Travessa	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	2,0	2,5	3,0
Travessa	2	Nicho de concretagem	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Viga longitudinal	1	Mancha de umidade	1,0	0,6	1,5	2,0	2,5	4,5
Viga longitudinal	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,6	1,5	2,0	2,5	9,0
Viga longitudinal	1	Nicho de concretagem	2,0	0,6	1,0	2,0	2,5	6,0
Viga longitudinal	1	Desalinhamento	2,0	0,6	1,0	2,0	2,5	6,0
Viga longitudinal	2	Mancha de umidade	1,0	0,6	1,5	2,0	2,5	4,5
Viga longitudinal	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,6	1,5	2,0	2,5	9,0
Viga longitudinal	2	Nicho de concretagem	2,0	0,6	1,0	2,0	2,5	6,0
Viga longitudinal	2	Desalinhamento	2,0	0,6	1,0	2,0	2,5	6,0
Pilar	1	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Pilar	2	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Pilar	3	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Pilar	4	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Pilar	4	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Encontro	1	Mancha de umidade	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	1	Percolação de água	2,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,0
Encontro	2	Mancha de umidade	1,0	0,2	0,5	2,0	2,5	0,5
Encontro	2	Percolação de água	2,0	0,2	1,0	2,0	2,5	2,0
Muro de contenção	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	1	Armadura exposta sem corrosão	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	1	Percolação de água	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	2	Armadura exposta sem corrosão	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	2	Percolação de água	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	3	Armadura exposta sem corrosão	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Muro de contenção	3	Percolação de água	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	4	Mancha de umidade	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Muro de contenção	4	Armadura exposta sem corrosão	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Muro de contenção	4	Percolação de água	2,0	0,4	1,0	2,0	2,5	4,0
Fundação	1	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	2	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	3	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Fundação	4	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	2,0	2,5	1,0
Aterro de acesso	1	Percolação de água	2,0	0,2	1,0	2,0	2,5	2,0
Aterro de acesso	2	Percolação de água	2,0	0,2	1,0	2,0	2,5	2,0

- Configuração de danos da ponte 3 no momento da inspeção: apresentada na TABELA 10.

- Configuração de danos da ponte 4 no momento da inspeção:

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Fissura estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Laje	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,5	1,5	2,5	4,5
Laje	3	Fissura estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Travessa	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Travessa	1	Eflorescência	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Travessa	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Viga transversina	2	Fissura estrutural	3,0	0,3	1,0	1,5	2,5	3,4
Pilar	1	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	1	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Pilar	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Pilar	1	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Pilar	2	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	2	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Pilar	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Pilar	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Pilar	3	Corrosão c/ deslocamento de conc.	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Pilar	3	Corrosão c/ perda de seção	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Pilar	4	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,0	2,0	2,5	2,0
Aparelho de apoio	1	Dano gerando esforço imprevisto	4,0	0,4	1,0	1,5	2,5	6,0
Aparelho de apoio	4	Dano não gerando esforço imprevisto	2,0	0,4	1,5	1,5	2,5	4,5
Fundação	4	Recalque diferencial	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Aterro de acesso	1	Deslizamento	2,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,0
Aterro de acesso	2	Deslizamento	2,0	0,2	1,0	2,0	2,5	2,0

- Configuração de danos da ponte 5 no momento da inspeção:

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Laje	1	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Laje	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Laje	2	Estalactite	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	3	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Laje	3	Vegetação incrustada	1,0	0,4	1,0	1,5	2,5	1,5
Travessa	2	Concreto segregado	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Viga longitudinal	1	Concreto segregado	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	1	Vegetação incrustada	1,0	0,6	1,0	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	2	Concreto segregado	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	2	Nicho de concretagem	2,0	0,6	1,0	1,5	2,5	4,5
Viga longitudinal	2	Vegetação incrustada	1,0	0,6	1,0	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	1	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	1,5	2,5	1,1
Viga transversina	1	Nicho de concretagem	2,0	0,3	1,0	1,5	2,5	2,3
Viga transversina	2	Mancha de umidade	1,0	0,3	1,5	1,5	2,5	1,7
Viga transversina	2	Estalactite	1,0	0,3	1,0	1,5	2,5	1,1
Viga transversina	2	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	1,5	2,5	1,1
Viga transversina	2	Nicho de concretagem	2,0	0,3	1,0	1,5	2,5	2,3
Pilar	1	Vegetação incrustada	1,0	0,4	1,0	1,5	2,5	1,5
Pilar	3	Fissura estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Pilar	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Aparelho de apoio	1	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Aparelho de apoio	2	Corrosão em elemento metálico	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Encontro	1	Mancha de fogo	1,0	0,2	0,5	1,5	2,5	0,4
Encontro	1	Mancha de umidade	1,0	0,2	1,0	1,5	2,5	0,8
Encontro	1	Percolação de água	2,0	0,2	1,0	1,5	2,5	1,5
Encontro	2	Fissura estrutural	3,0	0,2	1,0	1,5	2,5	2,3
Muro de contenção	4	Mancha de umidade	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Fundação	2	Desgaste superficial	1,0	0,4	0,5	1,5	2,5	0,8
Fundação	2	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Fundação	3	Desgaste superficial	1,0	0,4	1,0	1,5	2,5	1,5
Fundação	3	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Fundação	4	Desgaste superficial	1,0	0,4	1,5	1,5	2,5	2,3
Fundação	4	Corrosão (apenas mancha)	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5

- Configuração de danos da ponte 6 no momento da inspeção:

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Laje	1	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	1	Concreto segregado	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	2	Fissura estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	2	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	2	Concreto segregado	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	3	Fissura estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Laje	3	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Laje	3	Concreto segregado	2,0	0,4	0,5	2,0	2,5	2,0
Viga longitudinal	1	Fissura estrutural	3,0	0,6	1,0	1,5	2,5	6,8
Viga longitudinal	1	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	1	Concreto segregado	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	2	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga longitudinal	2	Concreto segregado	2,0	0,6	0,5	2,0	2,5	3,0
Viga transversina	1	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	1	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	2	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	2	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	3	Armadura exposta sem corrosão	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Viga transversina	3	Concreto segregado	2,0	0,3	0,5	2,0	2,5	1,5
Pilar	1	Fissural estrutural	3,0	0,4	1,0	1,5	2,5	4,5

Elemento	Nº	Manifestação patológica	B	K1	K2	K3	K4	IP
Pilar	4	Fissural estrutural	3,0	0,4	1,0	1,5	2,5	4,5
Pilar	4	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Pilar	4	Deformação excessiva	5,0	0,4	0,5	2,0	2,5	5,0
Aparelho de apoio	1	Dano não gerando esforço imprevisto	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Aparelho de apoio	2	Dano não gerando esforço imprevisto	2,0	0,4	1,0	1,5	2,5	3,0
Encontro	1	Fissural estrutural	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5
Encontro	2	Fissural estrutural	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5
Encontro	2	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,2	0,5	2,0	2,5	2,0
Muro de contenção	3	Fissural estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Muro de contenção	3	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Muro de contenção	4	Fissural estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Muro de contenção	4	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Fundação	1	Fissural estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Fundação	1	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Fundação	2	Fissural estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Fundação	2	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Fundação	4	Fissural estrutural	3,0	0,4	0,5	1,5	2,5	2,3
Fundação	4	Desplacamento por alta compressão	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Fundação	4	Recalque diferencial	4,0	0,4	0,5	1,5	2,5	3,0
Junta de dilatação	1	Obstrução causando restrição	2,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,0
Aterro de acesso	1	Recalque do aterro de aproximação	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5
Aterro de acesso	2	Recalque do aterro de aproximação	3,0	0,2	0,5	2,0	2,5	1,5

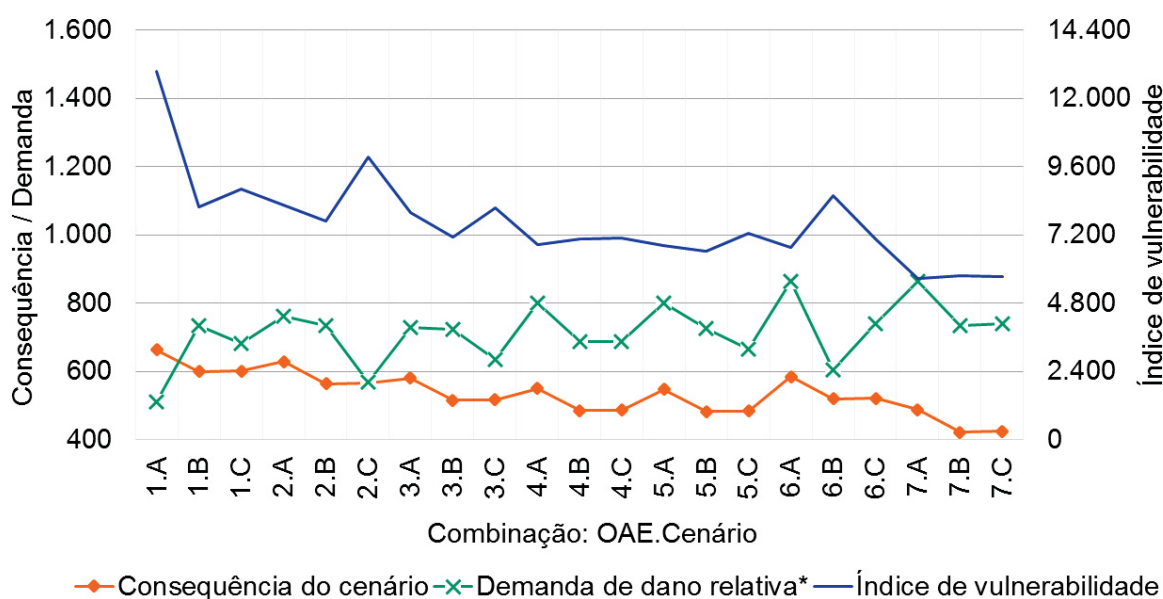
- Configuração de danos da ponte 7 no momento da inspeção: ponte estava em perfeito estado de conservação, não apresentando danos.

APÊNDICE 2 – ANÁLISE MATEMÁTICA DOS PARÂMETROS OIRUNDOS DO EXEMPLO 2

Buscando ilustrar o comportamento dos parâmetros que culminam no índice de vulnerabilidade, são apresentadas neste apêndice algumas análises matemáticas dos dados obtidos no exemplo 2. O objetivo das análises apresentadas é atestar que parâmetros envolvidos na obtenção do índice de vulnerabilidade apresentam padrões de comportamento distintos, e que assim de fato traduzem conceitos diferentes, apesar de partirem de dados similares.

No GRÁFICO A estão representados os valores de demanda de dano relativa, consequência, e índice de vulnerabilidade para cada ponte em cada cenário. É possível observar que apesar de os parâmetros de consequência e demanda de dano relativo partirem dos mesmos dados de entrada e serem provenientes de variações no cálculo de índices de performance, são resultados completamente distintos, não sendo possível identificar qualquer tendência de comportamento de relação existente entre estes. Este fato é considerado positivo e era buscado ao longo do desenvolvimento do modelo, pois mostra que realmente as equações desenvolvidas estão quantificando aspectos diferentes.

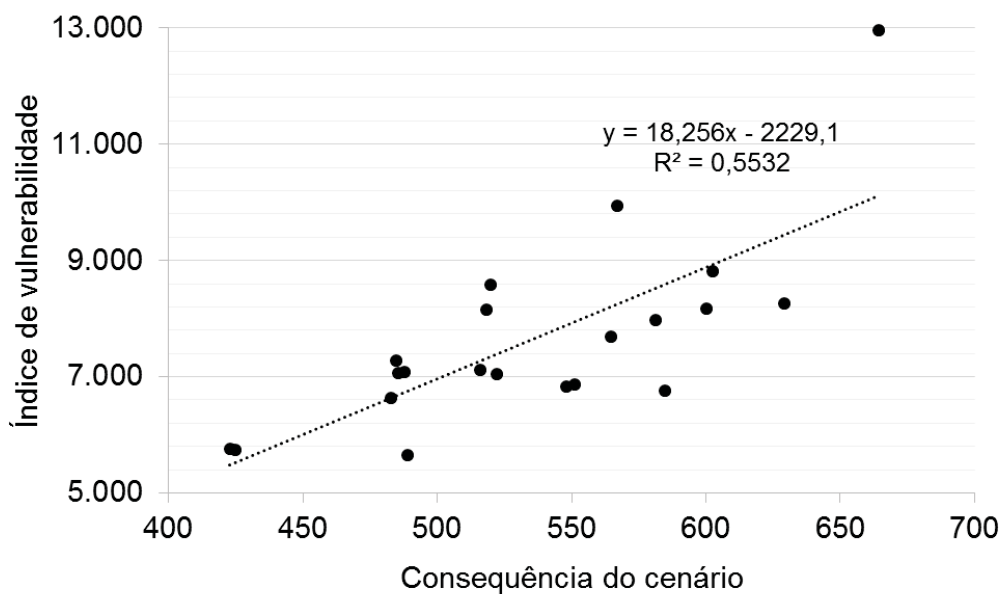
GRÁFICO A – CONSEQUÊNCIA, DEMANDA DE DANO RELATIVA, E ÍNDICE DE VULNERABILIDADE POR PONTE E CENÁRIO



FONTE: A autora (2018).

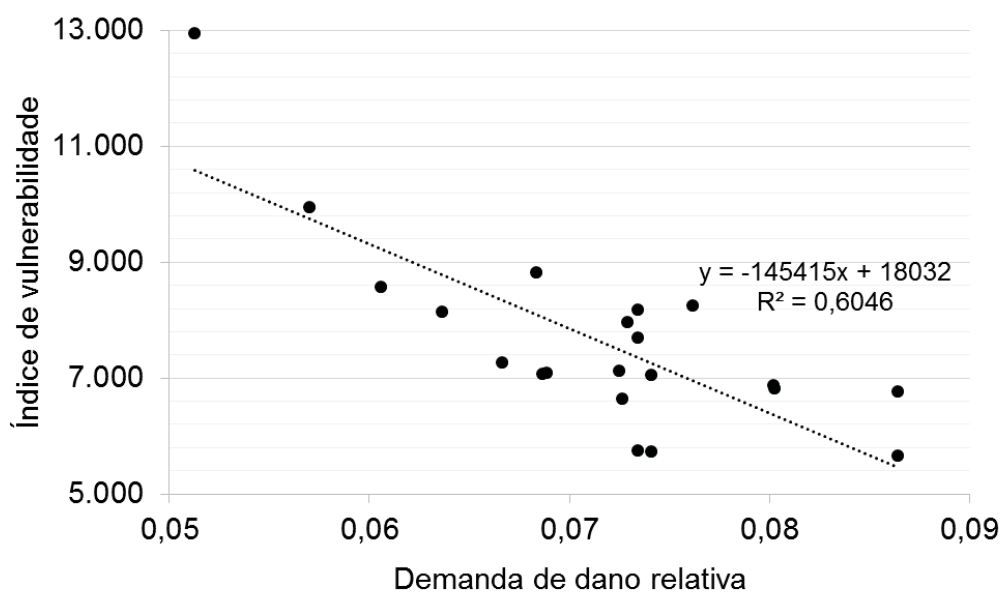
Os GRÁFICO B, C e D reforçam essa questão mostrando que, comparando os três parâmetros par a par (demanda de dano relativa, consequência, e índice de vulnerabilidade), não existe uma correlação perfeita ($R^2 = 1$) entre eles, algo considerado positivo pois reforça a individualidade dos respectivos conceitos.

GRÁFICO B – RELAÇÃO ENTRE CONSEQUÊNCIA E ÍNDICE DE VULNERABILIDADE



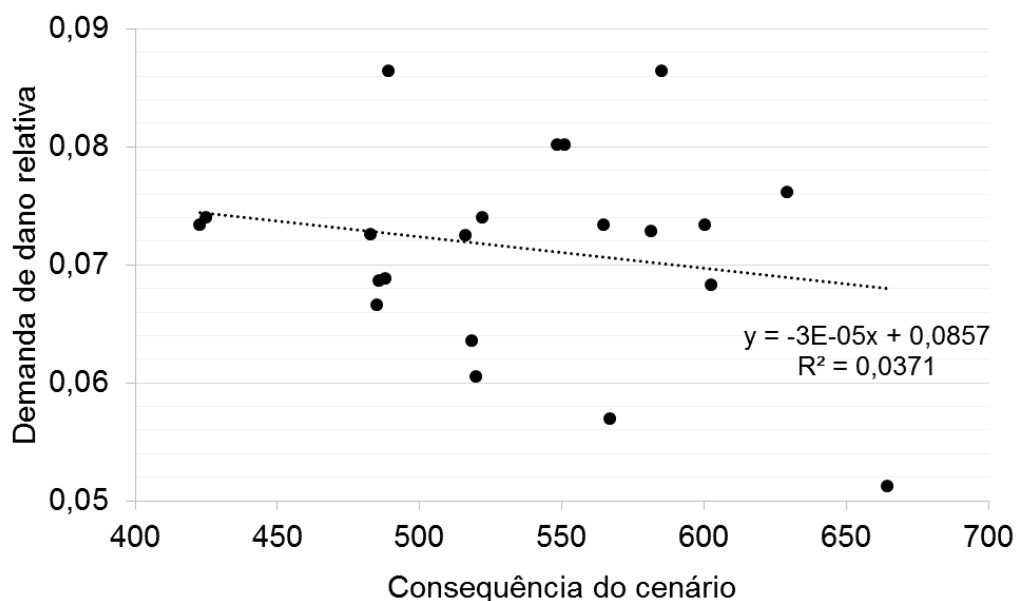
FONTE: A autora (2018).

GRÁFICO C – RELAÇÃO ENTRE DEMANDA DE DANO RELATIVA E ÍNDICE DE VULNERABILIDADE



FONTE: A autora (2018).

GRÁFICO D – RELAÇÃO ENTRE CONSEQUÊNCIA E DEMANDA DE DANO RELATIVA



FONTE: A autora (2018).

Enquanto o índice de vulnerabilidade é fruto de dois parâmetros, demanda de dano relativa e consequência, e requer análise especial para verificar a coerência das equações envolvidas, a demanda de dano relativa, por sua vez, também requer tal análise, pois também deriva de outros dois parâmetros. Assim os valores de demanda de dano relativa, demanda de dano e a demanda de dano máxima, decorrentes da aplicação dos três cenários nas sete pontes deste exemplo, estão apresentados na TABELA A e no GRÁFICO E –E.

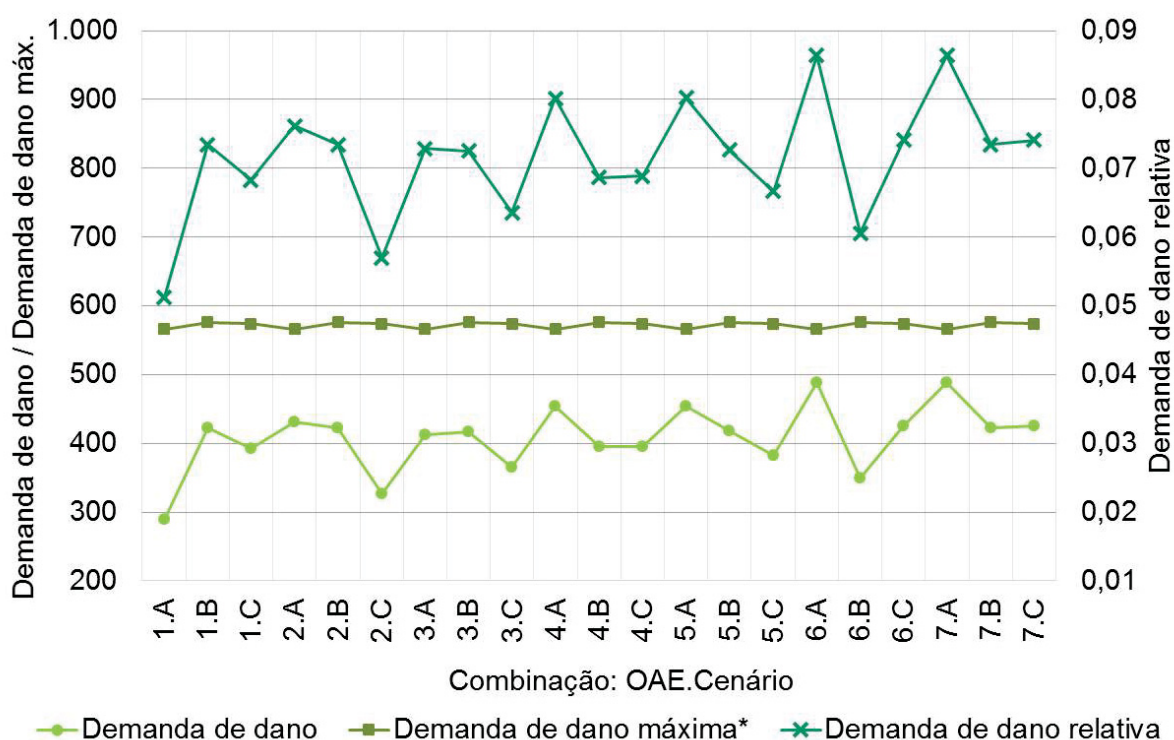
TABELA A – DEMANDA DE DANO, DEMANDA DE DANO MÁXIMA E DEMANDA DE DANO RELATIVA DECORRENTE DA APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS NAS PONTES

Ponte	Cenário	Demanda de dano	Demanda de dano máxima	Demanda de dano relativa
1	A	290,00	5658,00	0,0522
	B	422,75	5758,00	0,0760
	C	392,00	5738,00	0,0705
2	A	431,00	5658,00	0,0770
	B	422,75	5758,00	0,0755
	C	327,00	5738,00	0,0584
3	A	412,38	5658,00	0,0729
	B	417,38	5758,00	0,0738
	C	364,94	5738,00	0,0645
4	A	453,75	5658,00	0,0798
	B	395,38	5758,00	0,0695

Ponte	Cenário	Demanda de dano	Demanda de dano máxima	Demanda de dano relativa
5	C	395,00	5738,00	0,0694
	A	453,94	5658,00	0,0797
	B	418,25	5758,00	0,0735
	C	382,44	5738,00	0,0672
6	A	489,00	5658,00	0,0865
	B	348,75	5758,00	0,0617
	C	425,00	5738,00	0,0752
7	A	489,00	5658,00	0,0849
	B	422,75	5758,00	0,0734
	C	425,00	5738,00	0,0738

FONTE: A autora (2018).

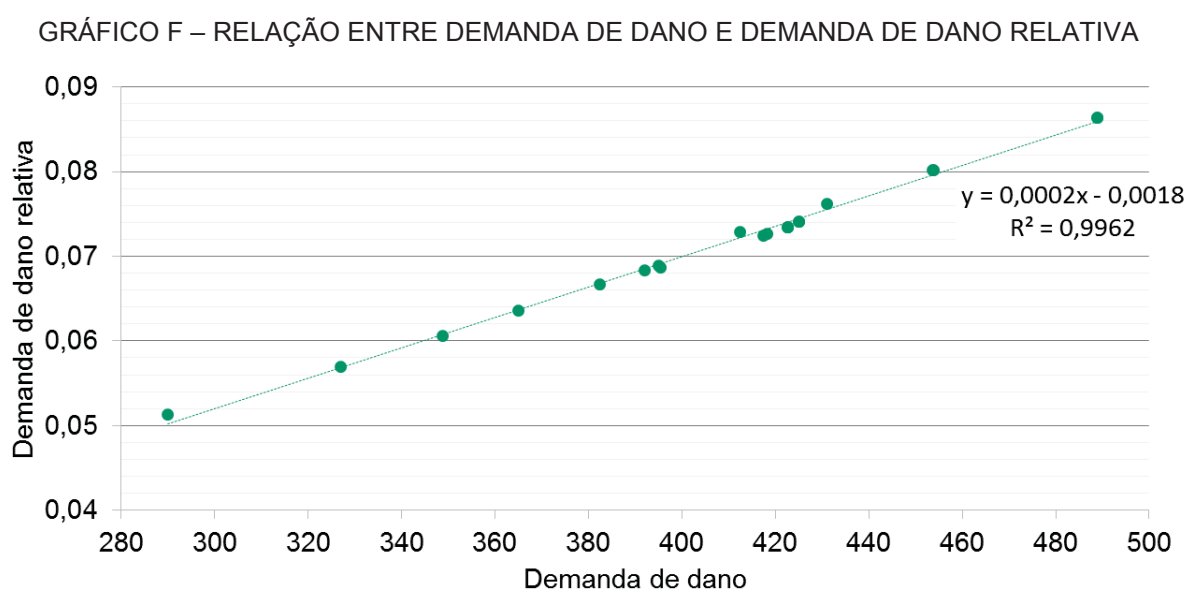
GRÁFICO E – DEMANDA DE DANO, DEMANDA DE DANO MÁXIMA E DEMANDA DE DANO RELATIVA POR PONTE E CENÁRIO



FONTE: A autora (2018).

Seguindo a linha das análises anteriores, é possível verificar graficamente a ausência de tendência de comportamento da correlação entre a demanda de dano máxima e as demandas de dano e de dano relativa. Entretanto, para o exemplo realizado, em uma análise superficial parecer existir correlação direta entre a demanda de dano e demanda de dano relativa, porém o GRÁFICO F demonstra que

esta correlação, apesar de ter um bom ajuste, não é direta. Esta correlação estreita ($R^2 \sim 1$) entre os dois parâmetros ocorreu para o exemplo apresentado, porque as demandas de dano máximas tiveram valores muito parecidos, uma vez que a morfologia das pontes era a mesma e este parâmetro é função da morfologia, e do elementos afetados pelo cenário de deterioração, de modo que o valor final da demanda de dano relativa acabou sofrendo maior influência dos valores da demanda de dano. Além disso, caso fossem utilizadas mais pontes no exemplo, percebe-se que haveria a tendência de diminuição do ajuste da reta.



FONTE: A autora (2018).